



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

# Wireless Sensor Network para mejorar la Eficiencia Energética en hogares y pymes y su integración en la Smart Grid

Tesis Doctoral

Juan Alberto Vera Gómez

Ingeniería en Informática

Directores

Dr. D. Andrés Iborra García

Dr. D. Fulgencio Soto Valles

2016

# **WIRELESS SENSOR NETWORK PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOGARES Y PYMES Y SU INTEGRACIÓN EN LA SMART GRID**

**Autor:** Juan Alberto Vera Gómez

**Directores:** Andrés Iborra García

Fulgencio Soto Valles

**Contacto:**



Copyright 2016 © Juan Alberto Vera Gómez

*“Todavía estoy aprendiendo”*

Francisco de Goya – escrito en un dibujo que realizó a los ochenta años –.





## RESUMEN

Durante los últimos años los ámbitos tecnológicos de la Redes de Sensores Inalámbricas – WSN – y la aplicación de las tecnologías de la información y comunicación sobre la redes eléctricas – Smart Grid – se han convertido en importantes campos de interés científico. De igual forma, la mejora de la Eficiencia Energética se ha convertido en una necesidad de la sociedad actual, debido al volumen de crecimiento de la población, y por lo tanto la demanda, y la dependencia energética actual de los combustibles fósiles.

Esta Tesis analiza en profundidad las diferentes posibilidades de aplicación de las WSN en el control energético de bajo voltaje, a través del diseño e implementación de un sistema, de bajo coste y de fácil implantación, capaz de optimizar el consumo energético en hogares y pymes.

El sistema descrito cuenta con una unidad de almacenamiento energético de respaldo que ayuda a minimizar la potencia pico requerida en la instalación, ayudando a balancear la curva de consumo del hogar o empresa. Este sistema opera conjuntamente con la WSN como un nodo más, haciendo la función de *Gateway* con la nube a la vez que aporta control e información a los usuarios de forma que estos puedan adoptar medidas por su parte en relación al uso que hacen de la energía.

Para dotar al sistema de capacidad de interoperación con otros sistemas y hacerlo accesible desde Internet en general se le ha dotado de capacidad de comunicación basada en IPv6 haciendo que la red pase a formar parte de lo que se ha dado a conocer como Internet de las Cosas – *Internet of Things, IoT* –.

De igual forma se expone la posibilidad de realizar una comunicación bidireccional con la productora eléctrica de forma que se obtenga información sobre las variaciones del precio de la electricidad que se consume, así como la posibilidad de reportar previsiones y modelos de demanda en tiempo real a la misma de forma que se acerca al concepto de Demanda Gestionada por el Hogar – *Home Energy Management, HEM* –.



## SUMMARY

In last years the technological knowledge areas of Wireless Sensor Networks – WSN – and the Smart Grid – Information and Communications Technology application over the electrical transportation network – became scientific areas of great interest. Similarly, the improvement on Energy Efficiency became a necessity in actual social context, due to the high population growth volume, and therefore the energy demand, and the actual energy dependency on fossil fuels.

This Thesis deeply analyses the different possibilities of WSN application on the low voltage energy control, through the design and implementation of a low cost system, easy to deploy, and able to optimise the energy consumption in households and SMEs.

The described system has a back-up energy storage unit that helps to minimise the peak power required in the installation. It also helps to balance the demand curve in the household or SME. This system jointly operates with the WSN as a extra node, making the role of Gateway with the cloud, at the same time it provides control capabilities and information to final users. This give final users the capacity of take measures relatives to the way they use the energy.

The system has a communication protocol based in IPv6 in order to provide it with interoperation capacity with other system and with access from Internet devices. In this way, all the nodes in WSN are included in the Internet of Things.

Finally, the possibility of perform a bidirectional communication with the Utility to obtain prices changes information from the Utility and the possibility of report back foreseen and demand models in real time to the Utility. It approaches the system to the concept of Home Energy Management – HEM –.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS.....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 Motivación.....	- 2 -
1.2 Objetivos .....	- 3 -
1.3 Reparto del trabajo en el documento .....	- 4 -
1.3.1 Capítulo 1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS .....	- 4 -
1.3.2 Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA.....	- 4 -
1.3.3 Capítulo 3. DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA HARDWARE.....	- 4 -
1.3.4 Capítulo 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL .....	- 4 -
1.3.5 Capítulo 5. DESPLIEGE Y ANÁLISIS DEL PROTOTIPO.....	- 5 -
1.3.6 Capítulo 6. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS.....	- 5 -
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA. ....</b>	<b>- 7 -</b>
2.1 Introducción .....	- 8 -
2.2 Sinergias entre WSN y Smart Grid .....	- 9 -
2.3 Eficiencia Energética en Hogares y Pymes.....	- 13 -
2.3.1 Energía y fuentes de energía .....	- 13 -
2.3.2 Contexto energético español .....	- 14 -
2.3.3 Consecuencias del consumo de energía. ....	- 17 -
2.3.4 Eficiencia energética .....	- 22 -
2.3.5 Soluciones de monitorización .....	- 29 -
2.4 Conclusiones .....	- 38 -
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA HARDWARE .....</b>	<b>- 39 -</b>
3.1 Introducción .....	- 40 -
3.2 Hardware de la Unidad Central.....	- 41 -
3.2.1 Unidad de Control de Energía .....	- 42 -
3.2.2 Baterías .....	- 44 -
3.2.3 Sistema de Gestión de Datos e Interfaz Física.....	- 46 -
3.3 Hardware del Power Meter Actuator .....	- 49 -
3.3.1 Main Board .....	- 49 -
3.3.2 Sensor Board .....	- 55 -
3.3.3 Actor Board .....	- 63 -
3.4 Conclusiones .....	- 66 -

<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL.....</b>	<b>- 67 -</b>
4.1	Introducción..... - 68 -
4.2	Software de la Unidad de Control ..... - 70 -
4.2.1	Unidad Gestión de Datos ..... - 70 -
4.2.2	Comunicación con la Nube ..... - 80 -
4.2.3	Interfaz de Usuario de la Unidad Central..... - 81 -
4.2.4	Comunicación con la Red de PMAs..... - 82 -
4.3	Consideraciones sobre Seguridad de las Comunicaciones..... - 83 -
4.3.1	Seguridad en red Personal Area Network – PAN – ..... - 83 -
4.3.2	Seguridad en comunicación con la nube ..... - 84 -
4.4	Software del Power Meter Actuator ..... - 86 -
4.4.1	Software de la Main Board ..... - 86 -
4.5	Software de Interfaz de Usuario Remota..... - 90 -
4.5.1	Requisitos de la aplicación de usuario ..... - 90 -
4.5.2	Sistema operativo Android..... - 95 -
4.5.3	Sistema operativo iOS..... - 96 -
4.5.4	Desarrollo Interfaz Usuario Remoto ..... - 98 -
4.6	Conclusiones ..... - 99 -
<b>CAPÍTULO 5. DESPLIEGE Y ANÁLISIS DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>- 101 -</b>
5.1	Introducción..... - 102 -
5.2	Despliegue del prototipo..... - 103 -
5.2.1	Consideraciones de Seguridad durante el Despliegue ..... - 103 -
5.2.2	Esquema de Despliegue ..... - 104 -
5.2.3	Modos de operación ..... - 105 -
5.3	Análisis de los Resultados ..... - 109 -
5.3.1	Semana de Operación en Real..... - 109 -
5.3.2	Proyección de Resultados..... - 111 -
5.3.3	Estudio de Mejora de la Eficiencia Energética y Costes ..... - 113 -
5.3.4	Relación directa entre el precio y la demanda..... - 117 -
5.4	Conclusiones ..... - 121 -
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS.....</b>	<b>- 123 -</b>
6.1	Conclusiones ..... - 124 -
6.2	Líneas de Trabajo Futuras..... - 125 -

6.3	Artículos publicados .....	- 126 -
-----	----------------------------	---------

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Artículos por año relacionados con "Smart Grid" en Elseiver. ....	- 9 -
Figura 2. Artículos por año relacionados con "Wireless Sensor Network" en Elseiver .....	- 9 -
Figura 3. Evolución de la intensidad energética primaria en la UE. – Fuente: EnR/IDEA – .....	- 15 -
Figura 4. Evolución de la intensidad energética final en la UE. – Fuente: EnR/IDEA – .....	- 16 -
Figura 5. Consumo de energía final por fuentes en España entre jul'12 y jun'13 – Fuente: MINETUR, CORES, ENAGAS, REE, CNE y elaboración propia – .....	- 17 -
Figura 6. Consumo de energía final por sectores del año 2011 en España – Fuente: Ministerio de Industria, energía y Turismo – .....	- 17 -
Figura 7. Generación eléctrica en 2011 en España .....	- 24 -
Figura 8. Etiquetas energéticas para varios tipos de electrodoméstico .....	- 28 -
Figura 9. Ejemplo de arquitectura del sistema TAC Vista .....	- 32 -
Figura 10. Ejemplo de arquitectura Circutor .....	- 35 -
Figura 11. Efficiency Data Server .....	- 36 -
Figura 12. CIREOS .....	- 36 -
Figura 13. Potencia consumida con y sin el AEE .....	- 37 -
Figura 14. Esquema eléctrico del inversor y las baterías .....	- 42 -
Figura 15. Comparación de las Unidades de Control de Energía estudiadas .....	- 43 -
Figura 16. Especificaciones Serie Victron MultiPlus .....	- 44 -
Figura 17. Comparativa de distintas configuraciones de Baterías .....	- 45 -
Figura 18. Pantalla táctil modelo uLCD32PTU .....	- 48 -
Figura 19. Diagrama de bloques Main board .....	- 52 -
Figura 20. Principales características del CC2538 .....	- 53 -
Figura 21. Esquemático de la Main Board .....	- 54 -
Figura 22. Representación del Anverso de la Main Board completa .....	- 55 -
Figura 23. Representación del Reverso de la Main Board completa .....	- 55 -
Figura 24. Esquemático de la Sensor Board .....	- 56 -
Figura 25. Representación de la Sensor Board Completa .....	- 57 -
Figura 26. Representación de todas las placas juntas. Vista de Perfil. ....	- 58 -
Figura 27. Sensor de Corriente: transformador de corriente .....	- 62 -
Figura 28. Sensores de corriente: resistencia shunt .....	- 62 -
Figura 29. Relés de estado sólido: CL240D10 .....	- 64 -
Figura 30. Relés de estado sólido: CS240D5 .....	- 65 -
Figura 31. Esquema general de comunicaciones .....	- 68 -
Figura 32. Esquema del Sistema .....	- 72 -
Figura 33. Diagrama de Flujo de Gestión de Potencia .....	- 73 -



Figura 34. Diagrama de Flujo de Gestión en Corte de Suministro.....	- 74 -
Figura 35. Comandos W de MK2 .....	- 75 -
Figura 36. Diagrama de Bloques Interno de PICASO.....	- 81 -
Figura 37. OAuth2: Concesión de Código de Autorización .....	- 85 -
Figura 38. Esquema de componentes de Coniki OS.....	- 87 -
Figura 39. Estructura Android .....	- 96 -
Figura 40. Estructura iOS.....	- 97 -
Figura 41. Ionic Framework.....	- 98 -
Figura 42. Despliegue real del sistema.....	- 105 -
Figura 43 Modo de Operación Directa - Normal -.....	- 106 -
Figura 44 Modo de operación de sobrepotencia - batería + proveedor CA -.....	- 106 -
Figura 45 Modo Carga de Batería .....	- 107 -
Figura 46 Modo Sistema Ininterrumpido de Alimentación - SAI - .....	- 108 -
Figura 47. Representación en la gráfica de potencias de cada uno de los modos de operación. ....	- 108 -
Figura 48. Datos reales usados para la obtención de ratios de eficiencia.....	- 109 -
Figura 49. Evolución de la energía proporcionada por la batería a lo largo de la semana.....	- 110 -
Figura 50. Evolución del consumo de la vivienda a lo largo de la semana. ....	- 110 -
Figura 51. Grafica de consumo horario del último semestre.....	- 112 -
Figura 52. Consumo diario del segundo semestre de 2015. ....	- 112 -
Figura 53. Coste por día de energía real en el último semestre de 2015 .....	- 115 -
Figura 54. Evolución del precio del kW en el último semestre de 2015.....	- 116 -
Figura 55. Comparación de costes mensuales con y sin sistema.....	- 117 -
Figura 56. Curva armonizada de consumo diario.....	- 118 -
Figura 57. Distribución armonizada del precio de la energía por horas.....	- 119 -
Figura 58. Superposición de la demanda armonizada contra el precio de la energía por horas.....	- 119 -

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Duración de las reservas actuales de fuentes de energía no renovables – Fuente: BP, Statistical Review of World Energy 2013 y Uranium 2011: Resources, Production and Demand .....	- 18 -
Tabla 2. Principales emisiones provocadas por el consumo energético .....	- 20 -
Tabla 3. Clasificación energías renovables .....	- 22 -
Tabla 4. Comparativa miniPCs .....	- 46 -
Tabla 5. Comparativa de protocolos de comunicación para redes de sensores.....	- 49 -
Tabla 6 Comparativa dispositivos medidores de energía.....	- 59 -
Tabla 7. Comparativa sensores de corriente .....	- 61 -
Tabla 8. Comparativa relés de estado sólido .....	- 63 -
Tabla 9. Datos estadísticos sobre los valores obtenidos en la muestra real.....	- 111 -
Tabla 10. Estudio de Costes Anuales con el Sistema Implantado.....	- 113 -
Tabla 11. Estudio de Costes Anuales con el Sistema No Implantado. ....	- 114 -

## ACRÓNIMOS

<b>WSN.</b>	Wireless Sensor Network. Redes inalámbricas cuyos nodos tienen sensores ambientales o de otro tipo.
<b>BMS.</b>	Battery Management System. Sistema de gestión energético.
<b>SOC.</b>	State-of-charge. Estado de carga de una batería, puede ser en valor absoluto o porcentual.
<b>SOH.</b>	State-of-health. Estado de salud de una batería, relacionado con el número de ciclos de carga-descarga que le restan, así como con la pérdida de capacidad por el paso de los mismos.
<b>EV.</b>	Electric Vehicle. Vehículo eléctrico, normalmente con una batería de litio y otro compuesto.
<b>DMS.</b>	Distribution Management System. Sistema de gestión de la distribución eléctrica.
<b>NV.</b>	Network Voltages. Voltajes de la red.
<b>NILM.</b>	Non-Intrusive Load Monitoring. Sistema no intrusivo de monitorización de carga, realiza la medida o la estima sin afectar a la propia medición aportando consumo.
<b>MOSFET</b>	Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor. Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor, utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas o eléctricas de voltaje muy bajo.
<b>PEM.</b>	Piezoelectromagnetic. Piezoeléctrico con componente magnético.
<b>DSM.</b>	Demand Side Management. Gestión desde el lado de la demanda energética.
<b>PCC.</b>	Power Conditioning Circuit. Circuito de condicionado de potencia, usado para regular la frecuencia y otros parámetros de la corriente de bajo voltaje.
<b>Smart Grid.</b>	Redes eléctricas + Sistema de Comunicación para su mejor gestión.
<b>HEM</b>	Home Energy Management. Sistema de gestión a partir de información obtenida desde las unidades de demanda.
<b>WAMR.</b>	Wireless Automatic Meter Reading. Medidor de potencia con capacidad de comunicación del conteo de forma inalámbrica.
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output. Entrada/Salida de Propósito General, pin genérico en un chip, cuyo comportamiento – pin de entrada o de salida – se puede

programar por el usuario en tiempo de ejecución.

**UART** Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Sistema de control de los puertos de comunicación en serie. El termino Universal hace referencia a que la velocidad de comunicación es variable.

**UDP** User Datagram Protocol. Protocolo de la capa de transporte – capa 4 del Modelo OSI – que permite el envío de datagramas a través de una red sin haber negociado una conexión.

**CoAP** Constrained Application Protocol. Protocolo simple que permite la comunicación de dispositivos electrónicos a través de Internet a través de UDP.

**IPv6** Internet Protocol versión 6. Última versión del protocolo de comunicación de internet que permite la identificación y localización de cada elemento conectado a la red, permitiendo el enrutado de de paquetes de información.

**PCB** Printed Circuit Board. superficie constituida por caminos o pistas de material conductor laminadas sobre una base no conductora. Se utiliza para conectar eléctricamente un conjunto de componentes electrónicos.

**IC** Integrated Circuit, circuito integrado, chip o microchip; estructura de pequeñas dimensiones de material semiconductor sobre la que se fabrican circuitos electrónicos y que está protegida dentro de un encapsulado de plástico o cerámica.

**RMS** Root Mean Square, Raíz Media Cuadrática o valor valor efectivo, aplicado a tension eléctrica.

## CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS.

En este capítulo se expone la motivación que ha llegado al desarrollo de esta Tesis Doctoral junto con los objetivos que se persiguen. En segundo lugar, se presenta la estructura de la presente memoria, describiendo de manera concisa el contenido.

## 1.1 MOTIVACIÓN

La mejora de la Eficiencia Energética es necesaria dado el alto crecimiento de la demanda a nivel mundial así como la dependencia en la energía obtenida a través del consumo de los cada vez más escasos combustibles fósiles.

Las características de las WSN las hacen idóneas para su despliegue en hogares y oficinas, donde evitar nuevos y costosos cableados así como el consumo energético asociado al propio despliegue es un factor importante.

La gestión de la eficiencia energética a través de las WSN es un paso lógico en este sentido, aprovechando las características propias de las WSN y aumentando la densidad en la monitorización y el control sobre el consumo eléctrico. Así mismo, el hecho de incorporar un sistema de gestión energética central con almacenamiento energético aporta una mayor flexibilidad en las políticas de gestión, dotando al sistema de mayor capacidad para optimizar el uso de la misma al tiempo que se reduce la potencia pico necesaria, que es la que marca la capacidad total del sistema.

Por último el hecho de poder intercambiar información con la Productora eléctrica abre una puerta a la gestión desde la unidad mínima de demanda que presenta mucho potencial para la optimización de la planificación de la provisión energética.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal es el diseño de un sistema viable para mejorar la Eficiencia Energética con control por puntos de consumo y armonizando la curva de demanda a través del almacenamiento energético que ayude a reducir el pico de potencia instalado. Otros objetivos secundarios serían:

- Analizar el estado del arte relacionado con la Eficiencia Energética y las tecnologías actuales que ayudan a mejorarla.
- Diseñar los nodos de la WSN capaces de medir la potencia por cada punto así como actuar sobre el mismo cortando la potencia cuando sea necesario para mantener el sistema estable y evitar sobre consumos.
- Evaluar los distintos mecanismo de almacenamiento energético en entornos habitados tales como las viviendas y las oficinas con espacio reducido.
- Plantear un sistema capaz de comunicarse con la productora eléctrica para obtener los cambios de precios de la electricidad en tiempo real así como proveedor de información sobre la previsión de la demanda a la productora.
- Analizar las implicaciones relacionadas con la seguridad tanto eléctrica como en las comunicaciones.
- Desplegar el sistema en un entorno real de forma continuada para evaluar su rendimiento y Testar el sistema en un entorno real
- Evaluar el rendimiento del sistema tanto económicamente como a nivel de energético.

### 1.3 REPARTO DEL TRABAJO EN EL DOCUMENTO

Este documento se ha dividido en 6 capítulos además de la bibliografía. A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

#### 1.3.1 CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

Donde se plantean los objetivos principales del trabajo y como se ha planteado. Se presenta un resumen que sirve a modo de ejecución y se explica someramente cada uno de los capítulos o secciones de este documento.

#### 1.3.2 CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA

Se realiza un análisis en profundidad del problema de base, la Eficiencia Energética, a la vez que se detalla el estado del arte tecnológico en cuanto a soluciones para gestionar y medir la misma en tiempo real. Se establece la sinergia y la base tecnológica que relaciona cada vez más a las WSN con la red de suministro eléctrico conectada – *Smart Grid* – y como ambas líneas de investigación han cobrado fuerza de forma paralela en los últimos años.

El estudio del estado del arte presenta un mapa de soluciones muy variadas pero que no termina de abordar el problema en profundidad, limitándose a soluciones de monitorización parcial con limitada interoperabilidad.

#### 1.3.3 CAPÍTULO 3. DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA HARDWARE

Se plantea de forma razonada la elección de cada uno de los componentes que formarán el sistema así como su diseño general. El sistema está formado una Unidad de Central compuesta por una Unidad de Gestión de Datos y un Sistema de Almacenamiento Energético, conectada con una red de nodos denominados Power Meter Actuators – *PMAs* – que se encargan de realizar la monitorización y, llegado el caso, la actuación sobre cada punto de energía destacado en la instalación.

#### 1.3.4 CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL

Se describen cada una de las tecnologías software utilizadas y las relaciones que hay entre ellas, así como los protocolos de comunicación necesarios para la coordinación del todo el Sistema y su



comunicación con el exterior. Se presentan los requisitos establecidos de cara a la interfaz de usuario así como la solución adoptada para el almacenamiento de datos en la nube para facilitar el acceso a los mismos en todo momento.

### 1.3.5 CAPÍTULO 5. DESPLIEGE Y ANÁLISIS DEL PROTOTIPO

Se presentan los condicionantes relativos a la seguridad que se han tenido en cuenta a la hora de instalar el prototipo, así como el despliegue del mismo en un entorno real, una vivienda. Igualmente se presentan los datos obtenidos durante la operación en real que se ha realizado durante todo el año 2015.

### 1.3.6 CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

Se exponen las conclusiones y las lecciones aprendidas durante la realización del trabajo, así como las posibles líneas de investigación que se han detectado durante la realización de este trabajo.



## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA.

A continuación se describen los estudios llevados a cabo en la Smart Grid y en Wireless Sensor Network que han llevado a producir la sinergia entre ambos campos tecnológicos para a continuación describir el estado actual sobre Eficiencia Energética en Hogares y Pymes.

## 2.1 INTRODUCCIÓN

Se observa que el número de artículos científicos sobre Wireless Sensor Networks y sobre Smart Grid publicados crece exponencialmente desde 2010 en ambos casos. Esto da una idea de la cantidad de estudios, prototipos y ensayos que se han llevado a cabo en los últimos 5 años en ambos campos.

De igual forma, se realiza un análisis del estado del arte de los sistemas tecnológicos de apoyo a la mejora de la eficiencia energética, así como de los estudios relacionados con ella en la actualidad.

## 2.2 SINERGIAS ENTRE WSN Y SMART GRID

A continuación se expone de forma concisa, a través de publicaciones remarcables, las sinergias a las que se han llegado entre dos de las tecnologías que han despertado más interés en los últimos 10 años, las Smart Grid y las Redes de Sensores Inalámbricas – WSN por sus siglas en inglés – tal y como indican el número de publicaciones asociadas.

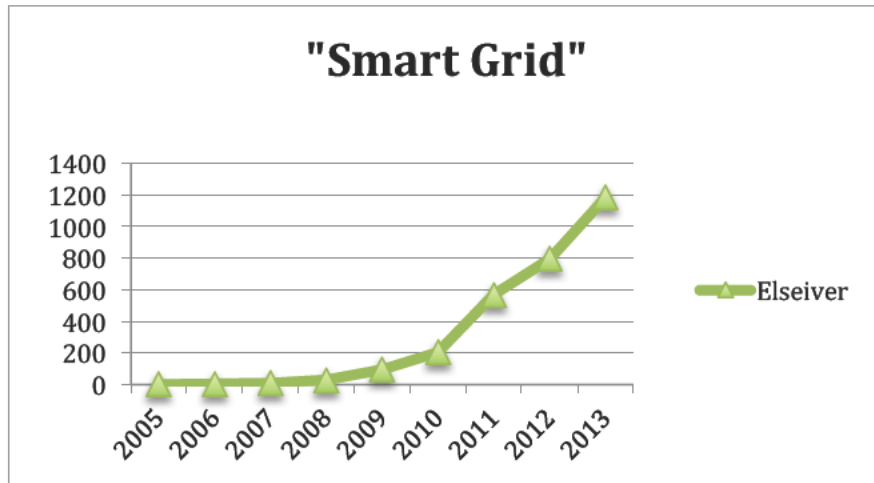


Figura 1. Artículos por año relacionados con "Smart Grid" en Elsevier.

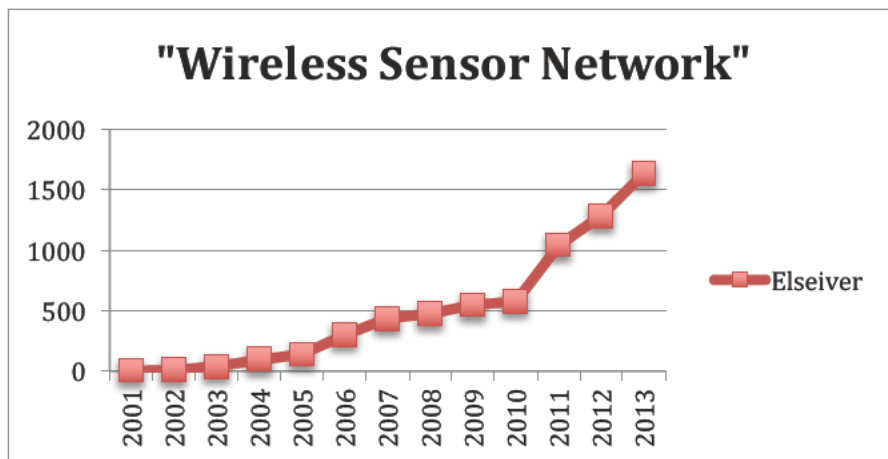


Figura 2. Artículos por año relacionados con "Wireless Sensor Network" en Elsevier

Se han tomado como referencia únicamente las publicaciones en Elsevier ya que es la que agrupa más cantidad de referencias de publicaciones. No se ha optado por incluir otras publicaciones ya que aparecerían referencias repetidas contra Elsevier.

El término Smart Grid comienza a cobrar fuerza con la llegada del siglo XXI (Amin, 2004; Amin and Wollenberg, 2005) exponiendo las deficiencias de la red eléctrica actual y la necesidad de dotarla de sistemas de comunicación para hacerla más robusta y eficiente. De igual forma, las WSNs han ido cobrando fuerza durante el cambio de siglo (Bult et al., 1996; Rabaey et al., 2000). Las aplicaciones que se han querido ver en esta nueva tecnología han sido muchas, si bien la evolución y mejora de costes de los dispositivos ha ido marcando el ritmo de su implantación.

Ya en el 2003 una tesis del MIT (Lee, 2003) presenta el problema de detección de dispositivos conectados a una red basados en su patrón energético. Esto sentará las bases para las herramientas de estimación de consumo de bajo coste basadas en un único sensor de potencia.

No será hasta el 2005 cuando las WSN comiencen a plantearse como sistemas de monitorización de potencia, orientado a la monitorización de maquinaria industrial (Lu et al., 2005). La necesidad de aumentar la autonomía energética a través de otros usos de fuentes energéticas también comienza a presentarse como un problema (Jiang et al., 2005), aunque más tarde quedará patente que el uso de energía ambiental renovable no será suficiente (Dewan et al., 2014).

La energía desaprovechada en los hogares se presenta como un problema grave (Williams and Matthews, 2007) al que se intenta dar solución a través de las WSN, sobretodo centrándose en los sistemas de calefacción, aire acondicionado y ventilación – HVAC – utilizando sensores térmicos (Ota, 2007). El problema de alimentación de los sensores se intenta solucionar a través del energy harvesting contextualizado, es decir, intentar obtener energía del propio medio que se monitoriza, en el caso de sensores de corriente alterna de la propia línea de corriente (Colomer et al., 2008; Dwari and Parsa, 2008). El uso de WSN se presenta como solución a la monitorización de fallos de motores industriales como una alternativa válida por su bajo coste, fácil implantación y alta densidad de muestreo (Lu and Gungor, 2009; Salvadori et al., 2009).

Se presentan evoluciones sobre el harvesting energético de los sensores de potencia de fácil implantación, obteniendo la energía del propio campo magnético generado por el cable de tensión (Bhuiyan et al., 2010; He et al., 2013; Leland et al., 2009; Tashiro et al., 2012), incluso la posibilidad de utilizar el mismo proceso de medición como proceso de alimentación (DeBruin et al., 2013). El uso de este proceso también se plantea para las WSN (Porcarelli et al., 2013). En 2009 ya se presentan sistemas WSN con actuadores – WSAN – para la monitorización de redes de bajo voltaje (Jiang et al.,

2009a, 2009b) y nuevas soluciones basadas en la ocupación de estancias (Marchiori and Han, 2010) y se plantean las ventajas y desventajas entre sistemas con varios puntos de monitorización de potencia y sistemas basados en un único punto situado en el panel del disyuntor (Giorgio and Pimpinella, 2012; Marchiori et al., 2011; Marchiori and Han, 2009; Xu et al., 2011). El uso de las mediciones de un solo punto se plantea como un problema a la hora de descubrir que componentes de consumo hay que cada edificio (Srinivasan et al., 2013). Las posibilidades de las WSN en el Smart Grid como proveedores de información en tiempo real hacen su aparición en 2010 (Gungor et al., 2010) mientras que comienzan aparecer estudios que indican el uso que se les podría dar a las WSN como sistemas de información para el usuario final y sus ventajas en cuanto al ahorro energético (Henry, 2010; Liu et al., 2011; Marchiori et al., 2012; Mattern et al., 2010; Weiss and Guinard, 2010), más adelante se incorporarán sistemas multidispositivo con interacción con los propios usuarios al planteamiento (Balaji et al., 2013). La eficiencia energética en edificios centrada en HVAC se mira desde el punto de vista de las Smart Grid, planteado la incorporación de información desde el lado de la demanda – DSM – para evitar picos (Nguyen et al., 2010), más adelante aparecerán sistemas propios que plantean posibilidades a nivel teórico (Botton-Fernandez et al., 2013) y algunos prototipos (Jung et al., 2013; Krishna et al., 2013).

Entre 2011 y 2012 las WSN se presentan como una útil herramienta para mejorar la eficiencia energética con monitorización de varios puntos de las redes de bajo voltaje. Se describen desde varios puntos de vista teóricos (Bellido Outeirino et al., 2013; de la Campa et al., 2011; Fortino et al., 2012; Grilo et al., 2012; Han et al., 2012; Linlin and Yunfang, 2012) y empíricos (Bellido-Outeirino et al., 2012; Byun et al., 2011; Foche et al., 2012; Ghosh et al., 2013; Kazandjieva et al., 2012; Levasseur et al., 2012; Rong and Yu, 2011; Weng et al., 2011). También se presenta el uso de Bluetooth y redes de GSM para comunicación interior y exterior entre los dispositivos (Kogawa et al., 2011). Aparece un concepto nuevo debido al crecimiento de sistemas EV en el mercado, el de usar las baterías de los mismos como refuerzo de la propia Smart Grid (Erol-Kantarci and Mouftah, 2011), este tema se presentará como algo con mucho potencial unos años más tarde (Ali et al., 2013). Así mismo, la seguridad de los sistemas de comunicación para las Smart Grids, y concretamente los basados en WSN que tiene baja capacidad de procesamiento se presentan como un reto (Liu, 2012). Las posibilidades de las WSN en la Smart Grid como monitores de la propia infraestructura se hacen patentes (Al-Anbagi et al., 2012; Bilgin and Gungor, 2012). Las posibilidades del uso de las WSN para

mejorar la gestión de las energías renovables dentro de las Smart Grid también queda planteada (Batista et al., 2013).

Se observa, por tanto la tendencia a incluir las WSN dentro de las tecnologías que en el futuro conformarán la Smart Grid, aunque las posibilidades de aplicación son variadas esta tesis se centrará en la optimización del lado de la demanda, partiendo desde el punto de vista del consumidor medio pero más extenso, los hogares y pymes. Para estos usuarios el sistema debe estar acotado en costes y tener una implantación relativamente fácil.



## 2.3 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HOGARES Y PYMES

A lo largo de la historia las sociedades han ido evolucionando en base a las innovaciones tecnológicas que permiten mejoras en la explotación de las fuentes energías. En la actualidad, de la energía dependen el funcionamiento de las fábricas, la obtención de alimentos y su preparación, la iluminación, la climatización de los hogares, el transporte de personas y mercancías, etc. Por lo que es frecuente encontrar en los medios de comunicación noticias referentes al sector energético – movimientos empresariales, el futuro de las energías renovables, crisis políticas entre países,... –. De hecho, asuntos como el precio del petróleo, el cambio climático y la eficiencia y el ahorro energético afectan de manera muy directa a todos, tanto a nivel macroeconómico – factura energética, balanza exterior, competitividad,... – como microeconómico – precios de los combustibles, factura eléctrica, desarreglos climáticos,... –.

En este documento se han recogido varios conceptos básicos sobre la energía y su utilización, el contexto energético en España y las consecuencias del consumo insostenible de energía. También se detallan los principios de la eficiencia energética y se presentan algunas de las soluciones comerciales propuestas para el ahorro en el consumo de energía en hogares y oficinas.

### 2.3.1 ENERGÍA Y FUENTES DE ENERGÍA

La energía es un recurso natural primario o derivado que permite realizar un trabajo o servir de subsidiario a actividades económicas independientes de la producción de energía. Desde el siglo XX la energía se utiliza habitualmente en forma de combustible químico o en forma de electricidad. La energía eléctrica empleada actualmente es siempre una forma secundaria de energía, obtenida de otra forma primaria de energía o tecnología energética – energía atómica, eólica, solar, cinética, biomasa, carbón, gas natural, petróleo, etc. –

Sin embargo, una fuente de energía es todo sistema natural, artificial o yacimiento que puede suministrar energía. La clasificación de las distintas fuentes de energía se puede realizar según varios criterios. Por un lado, se pueden clasificar según sean o no fuentes renovables, es decir, si existe una cantidad limitada de estas fuentes en la naturaleza o si por el contrario son inagotables. Otra característica que permite la clasificación es la forma de utilización. Si la energía se encuentra directamente en la naturaleza y no ha sido sometida a ningún proceso de transformación se denomina

primaria. Entre este tipo de energías se encuentran aquellas que requieren algún proceso de transformación previo al consumo – carbón, petróleo, gas natural, uranio – y las que se pueden utilizar directamente – sol, viento, agua embalsada, madera –. Por otro lado, la energía que se consume cada día en viviendas, industrias y transportes se denomina energía final. Para conseguir esta energía final, las fuentes de energía primaria han de ser transformadas para obtener las finales, pasando por las siguientes etapas: prospección – localización –, extracción, transporte hasta los centros de tratamiento, procesado – transformación –, transporte hasta los centros de consumo y consumo.

Los principales tipos de energía final son los derivados del petróleo – gasolinas, gasóleos, keroseno, butano, propano,... –, el gas natural y la energía eléctrica. A partir de ellas se extrae la energía en forma luminosa, mecánica y térmica. Cada una de éstas, a su vez, es susceptible de convertirse en cualquiera de las otras dos.

También es necesario señalar que cada fuente de energía tiene diferente contenido energético. Cuanto mayor sea el contenido energético más rentable será la explotación de la fuente, aunque también se debe tener en cuenta otros aspectos como costes, localización, extracción, transformación, etc. Las fuentes con mayor contenido energético son las de origen fósil – carbón, petróleo, gas natural – y el mineral de uranio, por lo que a lo largo de la historia, este tipo de fuentes han sido generalmente las más empleadas.

### 2.3.2 CONTEXTO ENERGÉTICO ESPAÑOL

Aunque en los últimos años como consecuencia de la crisis económica ha disminuido el consumo, el modelo energético español se caracteriza por una alta demanda energética, un elevado peso de los recursos fósiles y una dependencia exterior superior al 80 %, muy por encima de la media europea.

A continuación, se detallan los principales hechos y factores que caracterizan al sector energético español:

- **Alta dependencia del exterior.** Alrededor del 85 % de las fuentes de energía primaria son importadas – en la Unión Europea es tan sólo del 50 % –. Además del incremento en los gastos, esta situación implica riesgos inflacionistas y desequilibrios macroeconómicos en escenarios de precios del crudo al alza.

- **España es una isla energética.** No dispone de yacimientos de petróleo o de gas natural. Sin embargo, existen interconexiones eléctricas con Francia, Portugal, Andorra y Marruecos, y de gas natural con Francia, Portugal y Argelia – gaseoducto del Magreb –.
- **Intensidad energética elevada.** La intensidad energética en España es muy elevada lo que significa que para producir una misma cantidad de PIB consume mucha más energía que los países de nuestro entorno, incluso aquellos dotados con una estructura productiva y de un grado de desarrollo económico similar. Esta situación es debida fundamentalmente a la baja eficiencia del sector productivo, por lo que uno de los retos para los próximos años es desligar el crecimiento económico del consumo de energía. En la las siguientes Figuras se puede observar la evolución de la intensidad energética primaria y final respectivamente en los últimos años medida en kilos equivalentes de petróleo – *ktep* –, energía obtenida en la combustión de un kilo de petróleo, por el Producto Interior Bruto expresado en moneda constante del año 2000. Aunque en los últimos años se ha experimentado un ligero descenso en los niveles de intensidad energética en España debido a políticas de eficiencia y también provocados por la caída del consumo de energía como efecto de la crisis económica, estos niveles siguen siendo elevados en comparación con otros países de la Unión Europea.

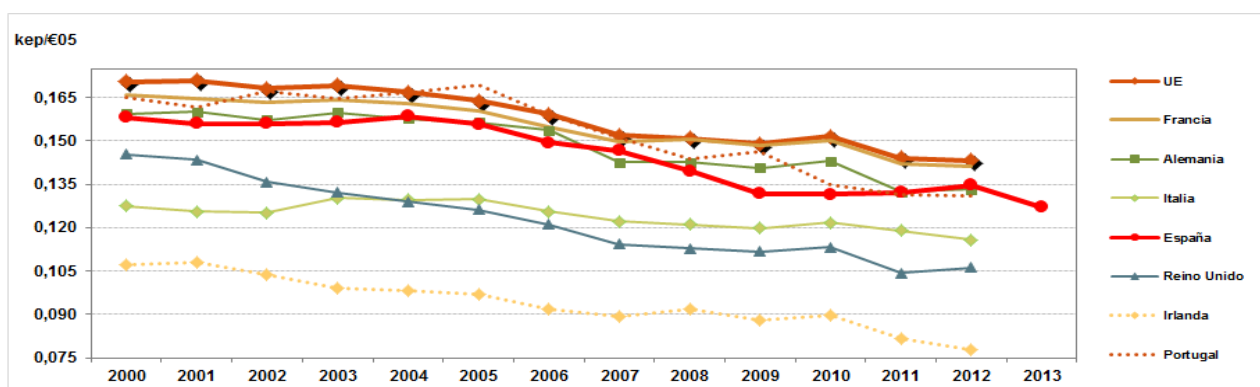


Figura 3. Evolución de la intensidad energética primaria en la UE. – Fuente: EnR/IDEA –

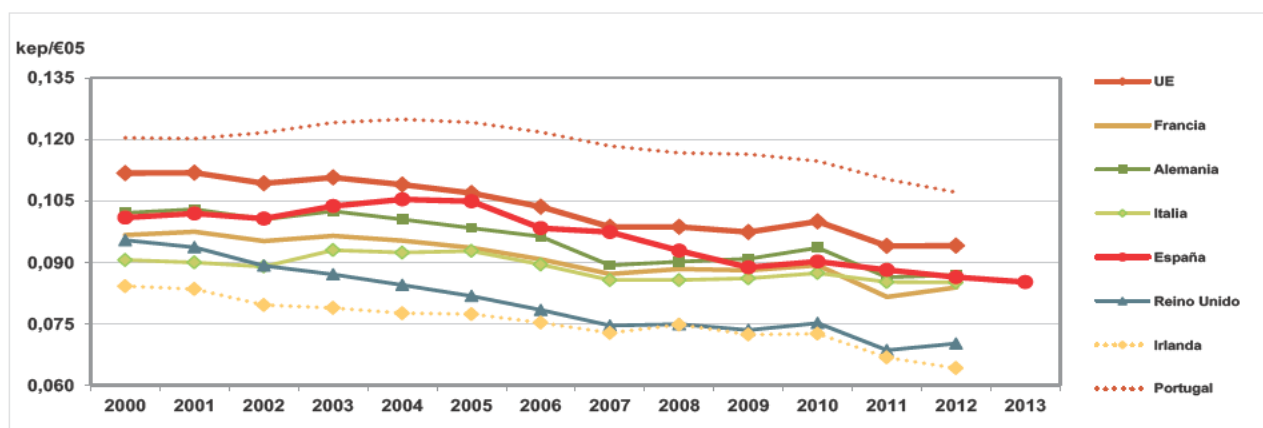


Figura 4. Evolución de la intensidad energética final en la UE. – Fuente: EnR/IDEA –

- **España es uno de los países más alejados de cumplir el protocolo de Kioto.** De hecho, el carbón es de gran importancia en la generación eléctrica a pesar de sus emisiones contaminantes. Se está trabajando en tecnologías de producción menos contaminantes o en carbón limpio, debido a que su utilización es necesaria durante muchos años más.
- **Desarrollo de nuevas centrales nucleares paralizado.** Esta paralización se debe al debate en la opinión pública sobre los peligros que entrañan las centrales nucleares. En España sólo quedan ocho grupos de generación nuclear.
- **Fuentes de origen renovable.** Las energías renovables constituyen el futuro de la generación eléctrica. El gobierno concede subvenciones con la finalidad de fomentar su consolidación y desarrollo para que puedan ser igual de competitivas o más que el resto de fuentes de energías.

En los últimos años se ha intentado diversificar el uso de fuentes energéticas, intentando disminuir el uso del petróleo y el carbón y la dependencia con el exterior. Desde la segunda mitad de los años 90 han comenzado a ganar peso fuentes como el gas natural y las energías renovables frente a los productos petrolíferos. En la Figura 5 se presenta la estructura de consumo de energía final por fuentes en el periodo comprendido entre julio de 2012 y junio de 2013, donde se puede observar que las energías renovables forman parte de las fuentes de energía utilizadas pero aún sigue siendo el petróleo la fuente dominante.

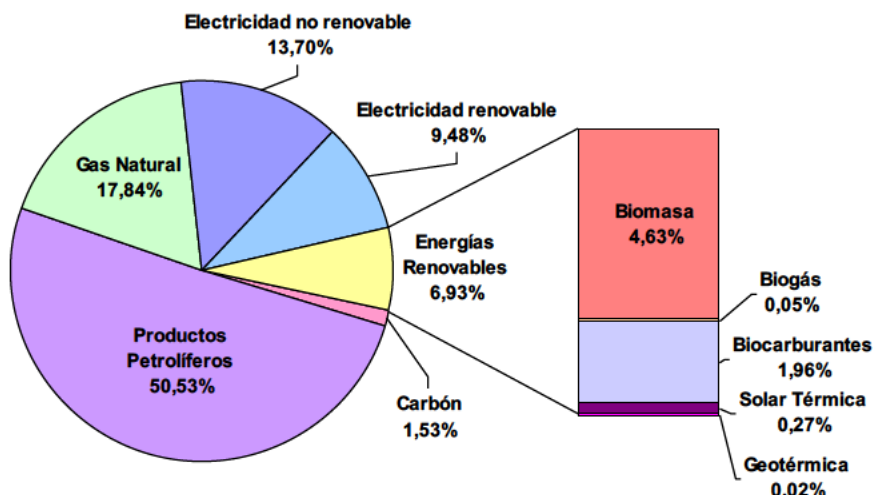


Figura 5. Consumo de energía final por fuentes en España entre jul'12 y jun'13 – Fuente: MINETUR, CORES, ENAGAS, REE, CNE y elaboración propia –

En cuanto a la distribución sectorial del consumo final de energía y como se puede observar en el gráfico de la Figura 6, el sector transporte es el principal consumidor, con el 41,45 % del consumo final total, seguido por el sector industrial y el consumo doméstico o residencial.

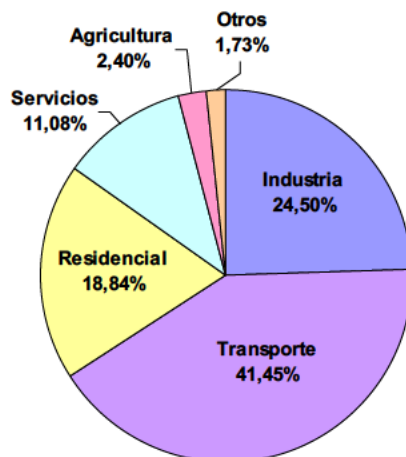


Figura 6. Consumo de energía final por sectores del año 2011 en España – Fuente: Ministerio de Industria, energía y Turismo –

### 2.3.3 CONSECUENCIAS DEL CONSUMO DE ENERGÍA.

Pese a ser necesario el consumo de energía para mantener y mejorar la calidad de vida, hay que ser conscientes de las consecuencias de un consumo insostenible. El modelo actual de desarrollo que predomina en nuestra sociedad de crecimiento continuo y basado en el consumo de energía no puede mantenerse indefinidamente. El agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, la concentración

de las reservas fósiles en áreas geográficas políticamente inestables, la falta de alternativas a corto plazo, el fuerte crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero y un incremento de los precios internacionales, a pesar del respiro que ha dado el mercado durante el año 2015, de los combustibles fósiles y de su volatilidad obligan a hacer un cambio de rumbo hacia un nuevo modelo basado en el desarrollo sostenible.

Los principales efectos que produce un consumo de energía insostenible son tres: el agotamiento de las energías no renovables, la inseguridad en el abastecimiento y el efecto sobre el medio ambiente.

#### Agotamiento de las energías no renovables

Como se ha comentado en apartados anteriores las energías no renovables tienen un ciclo de vida limitado. Por ejemplo, en el caso de las fuentes de energía fósiles – gas natural, petróleo y carbón – tienen un ciclo de formación de millones de años, por lo que, al ritmo de consumo actual, terminarán agotándose en poco tiempo o dejarán de ser económicamente rentables. Las fuentes de energía nuclear también se consideran fuentes no renovables debido a que existen reservas limitadas en la superficie terrestre de uranio y plutonio. En la siguiente Tabla, se muestran la duración aproximada en años de las reservas de fuentes de energía no renovables.

*Tabla 1. Duración de las reservas actuales de fuentes de energía no renovables – Fuente: BP, Statistical Review of World Energy 2013 y Uranium 2011: Resources, Production and Demand*

<b>Fuente de energía</b>	<b>Reservas probadas</b>	<b>Principales reservas</b>	<b>Duración de las reservas actuales</b>
<b><i>Carbón</i></b>	<i>860.938 millones de toneladas</i>	<i>EEUU, Rusia y China</i>	<i>109 años</i>
<b><i>Uranio</i></b>	<i>7.096.600 toneladas con un precio de US\$ 260/kg</i>	<i>Australia, Kazajistán y Canadá</i>	<i>Aprox. 100 años</i>
<b><i>Gas Natural</i></b>	<i>187.300 trillones de m<sup>3</sup></i>	<i>Irán, Rusia y Qatar</i>	<i>55,7 años</i>

<b>Petróleo</b>	<i>235.800 millones de toneladas</i>	<i>Arabia Saudí, Venezuela y Canadá</i>	<i>52,9 años</i>
-----------------	--------------------------------------	---	------------------

En España la contribución de estas energías al conjunto de la producción energética es cercana al 90 % según datos del año 2011, por lo que es de vital importancia fomentar la explotación de fuentes de energía renovables y el ahorro en el consumo energético.

#### Inseguridad en el abastecimiento

Otro de los grandes problemas derivados del consumo es la dependencia energética externa de algunos países debido a no disponer de yacimientos que permitan satisfacer la demanda nacional. En concreto la Unión Europea importa el 50 % de los recursos energéticos, mientras que en España más del 80 % de la energía procede de productos importados. En la Unión Europea las importaciones energéticas representan el 6 % de las importaciones totales, procediendo el 45 % de las importaciones de petróleo de Oriente Medio y el 40 % de las importaciones de gas natural de Rusia.

Esta dependencia externa conlleva riesgos económicos, sociales y físicos. Además, provoca que la Unión Europea no sea capaz de influir en el mercado internacional y que sea vulnerable a problemas políticos extranjeros, guerras, desastres naturales, etc.

#### Efecto sobre el medio ambiente

De la extracción, transformación, transporte y uso final de la energía se derivan importantes impactos medioambientales a nivel local y global.

En primer lugar, en la explotación de los yacimientos se producen residuos, contaminación de aguas y suelos, aparte de emisiones atmosféricas. Además, si la extracción es a cielo abierto, provocan un fuerte impacto visual y la destrucción del ecosistema. Asimismo, en relación con el proceso de transporte se pueden producir impactos de las líneas eléctricas, impactos de oleoductos y gaseoductos o hasta las llamadas mareas negras, con dramáticas consecuencias para los ecosistemas y economías de las zonas afectadas. Con la construcción de oleoductos, gaseoductos o la implantación de líneas eléctricas también se altera el ecosistema y suponen un gran impacto paisajístico.

Por otro lado, el abastecimiento energético a partir de energías fósiles necesita de un proceso de combustión. Este proceso se puede producir en las centrales térmicas para producir electricidad o

directamente en calderas y motores de vehículos. Esta combustión provoca la emisión de  $\text{CO}_2$ , principal gas de efecto invernadero, y de otros gases y partículas contaminantes. La generación de electricidad en plantas nucleares no produce  $\text{CO}_2$ , pero sí residuos radioactivos de difícil y costoso tratamiento.

De hecho, la producción de energía y su uso, tanto en la industria como en los hogares y medios de transporte, es responsable de la mayoría de las emisiones de  $\text{CO}_2$  causadas por el hombre. En la

se listan las principales emisiones provocadas por el consumo energético, sus orígenes y efectos. Como se puede observar, los efectos pueden ir desde provocar suciedad ambiental hasta alergias y efectos cancerígenos en los seres humanos.

*Tabla 2. Principales emisiones provocadas por el consumo energético*

<b>Emisión</b>	<b>Origen</b>	<b>Efectos</b>
<b><math>\text{CO}_2</math> – Dióxido de carbono</b> –	<i>Combustión</i>	- Efecto invernadero.
<b><math>\text{CO}</math> – Monóxido de carbono –</b>	<i>Combustión incompleta</i>	- Tóxico para el ser humano.
<b><math>\text{NO}_x</math> – Óxidos de nitrógeno</b> –	<i>Combustión</i>	- Lluvia ácida. - Irrita los bronquios.
<b><math>\text{SO}_2</math> – Dióxido de azufre –</b>	<i>Combustión</i>	- Lluvia ácida. - Alergias, irritación de ojos y aparato respiratorio.
<b><math>\text{COV}</math></b> – <b>Compuestos orgánicos volátiles</b> –	<i>Mala combustión o evaporación</i>	- Cáncer. - Alergias, irritación de ojos y aparato respiratorio.
<b>Partículas y humo</b>	<i>Mala combustión</i>	- Suciedad ambiental.



Otra de las principales consecuencias del consumo insostenibles de energía es el agravamiento del efecto invernadero. Este efecto se produce debido a que algunos de los gases que componen la atmosfera terrestre retienen parte de la energía que emite la superficie terrestre tras haber sido calentada por la radiación solar. Aunque este efecto se produce de forma natural y es esencial para la vida en la Tierra, sin él la temperatura sobre la corteza terrestre sería del orden de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Últimamente se está produciendo un incremento alarmante de los gases que provocan el efecto invernadero. La mayoría de estos gases se deben principalmente al uso intensivo de combustibles fósiles pero otras actividades humanas como la deforestación han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminarlos.

Los gases responsables del efecto invernadero son el vapor de agua –  $\text{H}_2\text{O}$  –, el dióxido de carbono –  $\text{CO}_2$  –, el metano –  $\text{CH}_4$  –, óxido de nitrógeno –  $\text{N}_2\text{O}$  –, el ozono –  $\text{O}_3$  – y los clorofluorocarbonos – CFC –. Aunque el vapor de agua es el gas con mayor presencia, es el  $\text{CO}_2$ , segundo en niveles de concentración, el que mayor influencia tiene sobre el efecto invernadero debido a sus propiedades radiactivas y a su larga permanencia en la atmósfera.

Debido al aumento en las concentraciones de estos gases, gran parte de la energía emitida por la superficie terrestre queda confinada al no poder atravesar la atmosfera incrementándose el efecto invernadero producido de forma natural y provocando un excesivo aumento de las temperaturas. Este incremento provoca cambios, muchas veces irreparables, en los ecosistemas y continuos desastres climáticos. En los último años el planeta ya ha sufrido algunas de estas perturbaciones como son la alteración de las temperaturas en las estaciones, la desertización o la disminución de masas de hielo en los polos y por tanto la subida del nivel del mar e inundaciones. Según cálculos de los expertos, debido a este calentamiento global la temperatura media en la Tierra aumentó  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  a lo largo del siglo XX y se espera que aumente entre  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el próximo siglo.

Para paliar las consecuencias del uso de energía de forma no sostenible es necesario establecer y seguir políticas basadas en la eficiencia energética para contribuir a mejorar la seguridad energética, suavizar el cambio climático y mejorar la competitividad económica.

### 2.3.4 EFICIENCIA ENERGÉTICA

La energía es imprescindible para el desarrollo económico y social, sin embargo, como se ha visto en apartados previos, el planteamiento actual de consumo y abastecimiento energético compromete el desarrollo de las generaciones futuras. Estas generaciones tendrán que enfrentarse al agotamiento de los combustibles, a problemas medioambientales de alcance mundial y a altos costes en los abastecimientos. No obstante, se pueden mejorar estas condiciones adoptando medidas que permitan un desarrollo sostenible. Este tipo de desarrollo consiste en utilizar los recursos naturales de forma que se minimicen los impactos ambientales y se favorezca el acceso a los recursos a todos los ciudadanos del planeta en unas condiciones económicas asequibles.

La eficiencia energética es una práctica que busca disminuir el gasto pero manteniendo los mismo servicios energéticos, sin que se vea afectada la calidad de vida ni el desarrollo tecnológico, protegiendo el medio ambiente, asegurando el abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible sobre el uso de la energía. Como concepto, la eficiencia energética es la relación que existe entre los productos o servicios finales y la cantidad de energía que es necesario emplear para obtenerlos.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables la manera más eficiente de generar electricidad y ahorrar costes económicos es mediante la utilización de energías renovables. Dependiendo del tipo de aplicación energética, eléctrica, térmica o como biocarburante, se pueden clasificar las energías renovables en tres categorías distintas. En la

se detallan las principales fuentes de energía renovables atendiendo a esta clasificación.

*Tabla 3. Clasificación energías renovables*

<b>Renovables de aplicación eléctrica</b>	
<b><i>Eólica</i></b>	<i>Energía cinética de las masas de aire de la atmósfera.</i>
<b><i>Solar</i></b>	<i>Fotovoltaica: radiación solar que produce electricidad gracias al efecto fotovoltaico.</i>  <i>Termoeléctrica: la radiación solar calienta un fluido produciendo vapor que genera electricidad a través de una turbina.</i>

<b><i>Hidroeléctrica</i></b>	<i>Transformación de la energía mecánica de un curso de agua.</i>
<b><i>Energía del mar</i></b>	<i>Energía obtenida por el movimiento de las olas – undimotriz –, mareas – maremotriz –, corrientes marinas, térmica oceánica y de ósmosis.</i>
<b><i>Geotérmica</i></b>	<i>Energía en forma de calor almacenada en yacimientos de alta temperatura debajo de la superficie terrestre.</i>
<b><i>Biomasa</i></b>	<i>Energía obtenida de la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico, industriales, municipales y de los combustibles sólidos recuperados.</i>
<b><i>Biogás</i></b>	<i>Energía obtenida a partir del combustible gaseoso producido a partir de la biomasa y de la fracción biodegradable de los residuos.</i>
<b><i>Residuos Municipales, Industriales y lodos de depuración – lodos EDAR –</i></b>	<i>Energía obtenida de los residuos generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, los generados en actividades industriales y los fangos procedentes de las estaciones depuradoras de aguas.</i>
<b>Renovables de aplicación térmica</b>	
<b><i>Solar térmica</i></b>	<i>La radiación solar calienta un fluido que posteriormente se emplea en el sector residencial, servicios, climatización de piscinas, calefacción, refrigeración – con la utilización de máquinas de absorción – y usos industriales.</i>
<b><i>Biomasa térmica</i></b>	<i>En una central térmica de biomasa se produce agua caliente o vapor para su distribución por una red de tuberías.</i>
<b><i>Geotermia</i></b>	<i>Obtención de calefacción y refrigeración mediante bomba de calor a través de la energía geotérmica de baja temperatura.</i>
<b>Biocarburantes</b>	
<b><i>Bioetanol</i></b>	<i>Se genera a partir de la fermentación de azúcares o almidón y es capaz de</i>

	<i>sustituir a la gasolina.</i>
<b>Biodiesel</b>	<i>Se obtiene a partir de plantas oleaginosas – colza, soja o girasol –, de aceites de fritura usados y grasas animales. Se puede emplear en lugar del gasóleo.</i>

En España se ha fomentado el uso de energías renovables mediante ayudas económicas. En la Figura 7 se puede observar como las energías renovables representaban un 29,25 % de la generación eléctrica en España en el año 2011, siendo la energía eólica la más empleada.

No obstante, en este gráfico también hay que destacar que, aunque en el 2011 el petróleo sólo representaba el 5,34 % de la generación eléctrica, en el año 2013 sigue siendo la energía final más consumida, debido a sus usos como combustible – Figura 5 –.

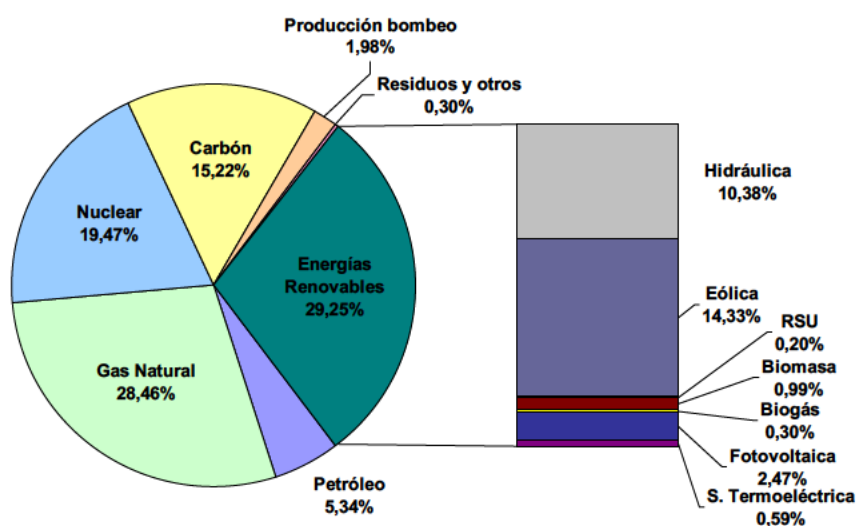


Figura 7. Generación eléctrica en 2011 en España

Para fomentar la utilización de las energías renovables la Unión Europea ha aprobado la Directiva 2009/28/CE cuyo objetivo es alcanzar una cuota del 20 %, en el caso de España, de energías renovables sobre el consumo de energía final total para el año 2020. Esta directiva es flexible en la adquisición de la energía pues permite medidas como pueden ser la transferencia de energía renovables entre estados miembros y sistemas de apoyo o proyectos conjuntos que permitan a todos los estados miembros, independientemente de su potencial y punto de partida, la consecución de su objetivo de cuota de energía renovable. Para cumplir con esta y otras directivas relativas a la eficiencia

energética se ha aprobado en España diferentes planes de acción en los que se proponen acciones con el objetivo de aumentar el ahorro de energía final y primaria.

Con este tipo de directivas y leyes se busca conseguir una disminución en los costes energéticos, reducir los problemas de abastecimiento de las energías no renovables y disminuir las emisiones contaminantes cumpliendo con el protocolo de Kioto. Este protocolo se firmó en el año 1997 por 36 países que se comprometieron a reducir las emisiones de seis de los gases que provocan el efecto invernadero: dióxido de carbono –  $\text{CO}_2$  –, metano –  $\text{CH}_4$  –, óxido nitroso –  $\text{N}_2\text{O}$  –, perfluorocarbonos – PFC –, hidrofluorocarbonos – HFC – y hexafluoruro de azufre –  $\text{SF}_6$  –. Entró en vigor en 2005 y pretendía reducir en un porcentaje de al menos un 5 % las emisiones, dentro del periodo 2008-2012, con respecto a las emisiones del año 1990. En 2009 ya eran 187 los países que habían firmado este acuerdo. Actualmente se ha ratificado un segundo período de vigencia que comprende el periodo 2013-2020 pero muchos países industrializados como Estados Unidos, Rusia, Japón y Canadá han decidido no respaldarlo.

No obstante, a pesar de estas directivas, planes de acción y protocolos, España se encuentra muy alejada de las principales potencias económicas europeas y de la media comunitaria en niveles de eficiencia energética. Además, y como se ha mencionado previamente, España también ha sido uno de los países más alejados de conseguir los objetivos en reducción de emisiones contaminantes establecidos en el protocolo de Kioto.

En la Figura 7 se observó que los sectores que realizaban un mayor consumo de energía eran el sector industrial, el sector residencial y el transporte, por lo que en los siguientes apartados se tratan las principales medidas de eficiencia energética que se pueden aplicar en estos sectores.

#### Sector industrial

Para mejorar la eficiencia en el sector industrial la mejor medida es el uso de energías renovables. Otras medidas de ahorro pueden ser optimizar los procesos industriales, mejorar el aprovechamiento del reciclaje de materiales y materias primas, implementar nuevas tecnologías o reciclar los residuos industriales y productos derivados.

Uno de los sistemas desarrollados para mejorar la eficiencia energética en la generación de energía son los sistemas de cogeneración. Estos sistemas obtienen energía eléctrica y energía térmica útil a

partir de un único combustible. En un proceso de cogeneración el calor en forma de vapor de agua a alta presión sale de las turbinas de producción de energía eléctrica y se aprovecha en cualquier actividad en la que se necesite energía térmica como pueden ser algunos procesos productivos – papel, textil, química, vidrio, refino de petróleo, etc. –, climatización y tratamiento de residuos – biogás, lodos, residuos de vacuno y porcino –. Estas centrales permiten consumir menores cantidades de combustibles y reducir las emisiones, provocan menos pérdidas en la red eléctrica debido a que suelen estar más cerca del punto de consumo, permiten que entren en el mercado de la electricidad nuevos competidores fomentando la competencia y favorecen la creación de nuevas empresas.

Hay otras modalidades de cogeneración como son la tri-generación en la que se obtiene también frío a partir del calor residual mediante sistemas de absorción, o la tetra-generación que genera, además de electricidad, calor y frío, energía mecánica aprovechable, por ejemplo, para generar aire comprimido.

Es necesario destacar que en el sector industrial los consumos energéticos son unos de los factores claves de la competitividad entre empresas, por lo que ser energéticamente eficiente implica aumentar la competitividad en el mercado.

### Sector residencial

Debido a la evolución tecnológica y al incremento del equipamiento doméstico en las últimas décadas se ha incrementado el consumo energético de los hogares españoles. En España el consumo energético en hogares es inferior al resto de países de la Unión Europea debido a sus condiciones climáticas, aún así, representa el 18,8 % del consumo total por sectores.

Para reducir este consumo energético se puede recurrir a construcciones bioclimáticas. En estas construcciones se diseñan los edificios de forma que aprovechen las condiciones climáticas lo máximo posible permitiendo un confort térmico y de iluminación sin tener que recurrir a sistemas artificiales. Por ejemplo, estos edificios suelen estar fabricados de forma que los muros proporcionen aislamiento térmico y con ventanas con sistemas de doble cristal o carpinterías de rotura de puente térmico para evitar pérdidas de calor. También se suele buscar la mejor orientación de la casa y de las ventanas buscando mayor o menor radiación solar dependiendo del clima de la zona. Este tipo de arquitectura también está ligada a los proceso de construcción ecológica, responsables con el medio ambiente al

ocupar recursos de manera eficiente. Aunque este tipo de viviendas tiene altos costes de construcción, el ahorro y la sostenibilidad alcanzados pueden llegar a amortizar este incremento de costes.

No obstante, en todas las viviendas de nueva construcción se debe emitir la Certificación de Eficiencia Energética de Edificios, donde se califica al edificio en función su eficiencia energética. Esta información promueve la mejora de la calidad energética de los nuevos edificios y proporciona transparencia al mercado inmobiliario.

Otra manera de reducción del consumo energético en los hogares es la elección de equipos de calefacción, electrodomésticos e iluminación más eficientes. Es recomendable adquirir equipos de calefacción y aire acondicionado que permitan una autorregulación según las condiciones térmicas de la vivienda en cada momento. Además, en Europa se ha establecido un sistema de etiquetado obligatorio para aquellos electrodomésticos que más consumen como son los frigoríficos y congeladores, lavadoras, lavavajillas, secadoras, lavadoras-secadoras, lámparas domésticas, televisores, hornos eléctricos y sistemas de aire acondicionado. Esta etiqueta energética clasifica al electrodoméstico con un código de colores y letras que va desde el color verde y la letra A+++ (de la letra A existen cuatro niveles de eficiencia en función del número de '+'), para los equipos con mayor eficiencia, al color rojo y la letra D, para los de menor eficiencia. La etiqueta también incluye el nombre del proveedor o marca e identificador del modelo, el consumo de energía anual del equipo, el nivel de ruido que genera y características específicas como pueden ser la capacidad de congelación, el consumo de agua, etc., que dependen de cada tipo de electrodoméstico.

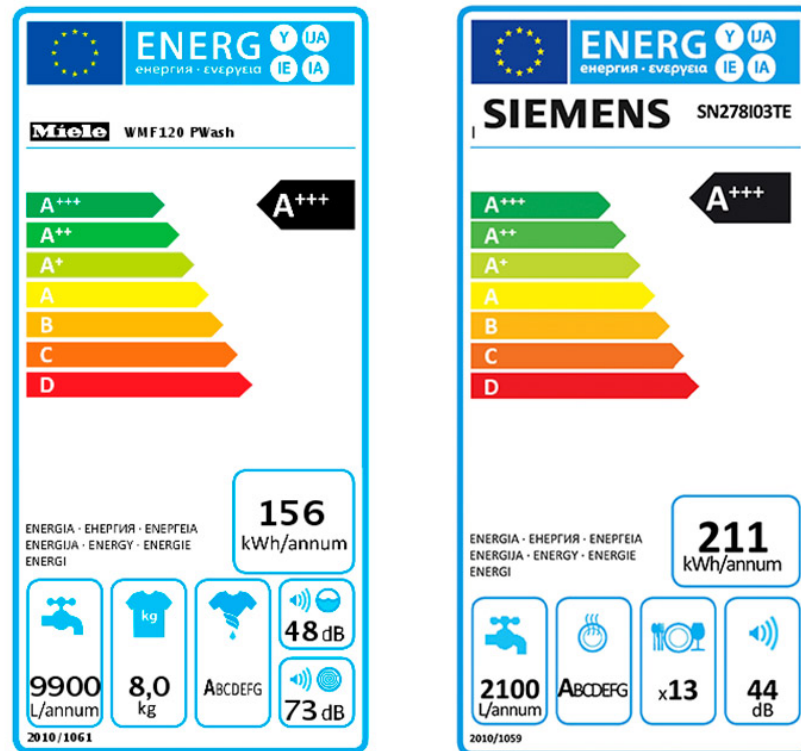


Figura 8. Etiquetas energéticas para varios tipos de electrodoméstico

Otro punto importante en el ahorro de energía en el sector residencial es la utilización de calefacción centralizada colectiva en lugar de sistemas individuales. Con la calefacción central se utiliza una sola caldera grande cuyo rendimiento es mayor que el de calderas más pequeñas y se da servicio a un bloque de viviendas o comunidad por completo.

Sin embargo, uno de los aspectos vitales para la aumentar la eficiencia energética en los hogares es la modificación de los hábitos de consumo. El ahorro de energía en las viviendas comienza con las acciones individuales de sus habitantes. Utilizar bombillas de bajo consumo, emplear solamente la luz eléctrica necesaria, mantener los equipos completamente apagados cuando estén sin utilizarse por un alto periodo de tiempo, ajustar los sistemas de climatización con temperaturas moderadas y todas aquellas medidas que contribuyen a disminuir el consumo contribuyen a mejorar la eficiencia energética en los hogares.

## Transporte

En el sector transporte se incluye tanto el transporte de personas como el transporte de mercancías. Es el sector de mayor consumo en España debido al crecimiento social y económico que ha propiciado un aumento en el número de vehículos personales en los últimos años. Aunque con la



crisis económica el número de coches de nueva matriculación ha disminuido considerablemente, el transporte privado continúa siendo el medio de transporte más utilizado, representado el 15 % de la energía final consumida en España. De hecho, el elevado consumo de productos petrolíferos como energía final, se debe al elevado índice de utilización del transporte, por ser sus principales carburantes el gasoil y la gasolina. En cuanto a costes, el transporte también representa uno de los conceptos dentro del presupuesto familiar con mayor peso.

Asimismo, los vehículos privados son la principal fuente de contaminación y ruido en ciudad y una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero debido a los procesos de combustión en los motores. No obstante, actualmente para reducir las emisiones de los óxidos de nitrógeno, el CO y los hidrocarburos no quemados se emplean catalizadores y se realizan procesos para la eliminación del plomo en la gasolina. Sin embargo, las emisiones de CO<sub>2</sub> son inevitables con el uso de este tipo de combustibles.

Debido a estos problemas se están convocando ayudas por parte del estado para la compra de vehículos nuevos, más eficientes que los modelos antiguos que constituyen una parte significativa del parque móvil, como el Plan Renove o las ayudas al desarrollo y comercialización de vehículos híbridos o eléctricos. Otra posible solución para la disminución de los efectos contaminantes en el sector del transporte es el uso de otros combustibles como el gas natural, el hidrógeno o biocarburantes.

De igual forma se está fomentando la realización de cursos o programas que promueven la conducción eficiente. Mediante hábitos como arrancar el motor sin acelerar, utilizar generalmente marchas largas y circular a bajas revoluciones de motor, mantener una velocidad de circulación lo más uniforme posible, utilizar el aire acondicionado de forma moderada o apagar el motor en paradas largas pueden suponer un gran ahorro en el consumo de combustible. Estas medidas no sólo reducen la disminución de las emisiones contaminantes, sino también el gasto económico en combustible y el coste de mantenimiento del vehículo. Sin embargo, también se está promoviendo el uso del transporte público, el emplear la bicicleta o realizar desplazamientos a pie cuando el trayecto no suponga grandes distancias o el compartir el coche en los desplazamientos habituales.

### 2.3.5 SOLUCIONES DE MONITORIZACIÓN

A continuación se presentan algunas de las soluciones técnicas y comerciales actuales sobre eficiencia energética en hogares y oficinas. Estas soluciones tienen como objetivo principal reducir al

máximo el consumo de energía mediante la actuación sobre los dispositivos de calefacción, aire acondicionado y luminarias principalmente, aunque también persiguen la reducción de armónicos y de energía reactiva en la red eléctrica. Los armónicos son generados por algunos equipos y generan distorsiones de tensión en la red, sobrecargando los cables, provocando fallos en relés e interruptores automáticos, y alterando el funcionamiento de muchos aparatos eléctricos. Por otro lado, la energía reactiva se debe a que algunos equipos de carácter inductivo como motores, transformadores o luminarias la necesitan para su funcionamiento. Es una energía que realmente no se consume pero a partir de cierta cantidad las compañías eléctricas incluyen un término de penalización en la factura eléctrica. La energía reactiva también puede provocar pérdidas de potencia en las instalaciones, caídas de tensión, sobrecargas en los transformadores, etc.

### Soluciones Schneider Electric

La compañía Schneider Electric ofrece un amplio catálogo de productos relacionados con el sector energético. Sus productos y soluciones están destinados a la mejora de la eficiencia energética, la automatización y el control industrial, la distribución eléctrica y la gestión de edificios. También ofrece una solución completa para la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios comerciales y residenciales y una amplia gama de cursos de formación técnica para clientes y para la comunidad educativa.

Schneider Electric ofrece un amplio abanico de soluciones para la gestión de la eficiencia energética en hogares, entre ellas varios programas de medida y evaluación para el diseño de sistemas de control y soluciones de supervisión y actuación como el sistema PowerLogic.

El sistema PowerLogic está diseñado para el control del coste, la calidad y la fiabilidad de la energía eléctrica. Este sistema es capaz de localizar excesos de capacidad, identificar equipos sobrecargados y equilibrar cargas en subestaciones, cuadros de distribución y otros equipos eléctricos. PowerLogic integra diferentes dispositivos de protección, control y medida de media y baja tensión de Schneider Electric y ofrece software de comunicación y pasarelas preconfiguradas para facilitar su integración.

En este sistema se instala en la red eléctrica una serie de dispositivos de medida y actuación conectados mediante ModBus TCP/IP y RS485 que se comunican vía USB o Ethernet a un PC donde se ejecuta el software PowerView. Este software se encarga de la adquisición e integración de datos, realiza tareas de control en tiempo real, gestiona la base de datos del sistema y genera informes.

Aunque PowerView es básicamente un software de supervisión, también puede emplearse para controlar los dispositivos, por ejemplo, provocar la apertura o cierre de un interruptor automático. Además, ciertas acciones automáticas o de control en la red se realizan a través de PLCs – *Programmable Logic Controls*, Controladores Lógicos Programables – integrados en el sistema. Para entornos industriales o grandes instalaciones, Schneider Electric ofrece el software ION Enterprise que permite realizar cálculos complejos con los datos adquiridos y realizar diferentes análisis de fiabilidad y calidad de energía.

En definitiva, el sistema PowerLogic permite realizar una supervisión del consumo de energía, realizar un seguimiento en los costes energéticos, realizar planificaciones estratégicas que permitan evitar interrupciones y realizar un mantenimiento y una gestión proactiva del sistema eléctrico de un edificio.

Dentro de las soluciones en sistemas para la gestión de edificios, Schneider Electric también ha desarrollado los sistemas TAC Vista y Andover Continuum. Estos sistemas permiten supervisar y controlar la calefacción, la ventilación, el aire acondicionado, la iluminación, el control de acceso y otros sistemas de seguridad. Están basados en tecnologías abiertas que permiten la integración de sistemas de distintos proveedores en una sola red.

En la Figura 9 se muestra un ejemplo de arquitectura del sistema TAC Vista donde se puede apreciar una subred de controladores energéticos y sensores interconectados mediante el estándar LonWorks, una subred de dispositivos de control de acceso y alarmas de intrusión e incluso una subred de cámaras de videovigilancia. Todas estas subredes se conectan mediante Ethernet a distintas estaciones de control y a la nube para ser accesibles desde dispositivos móviles.

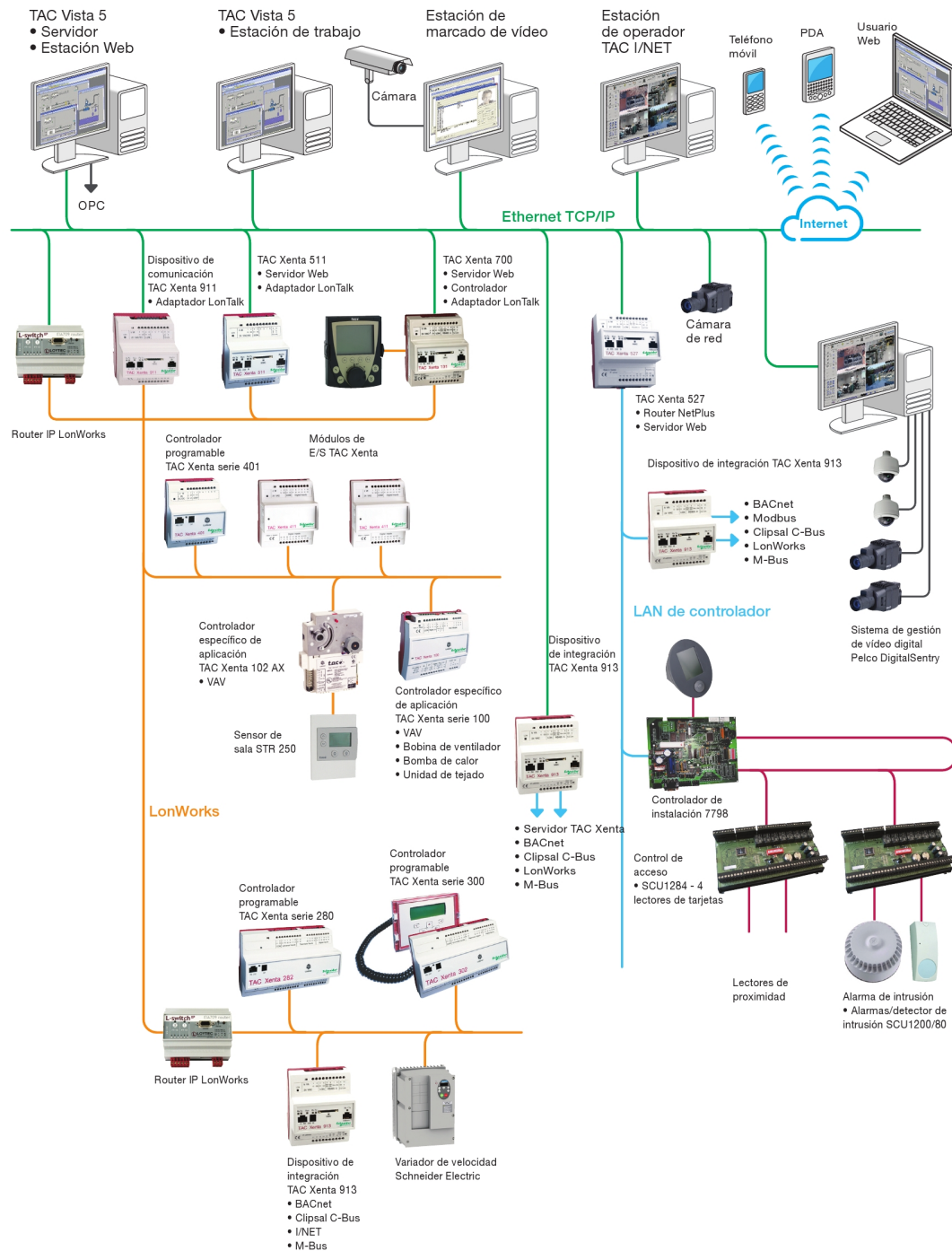


Figura 9. Ejemplo de arquitectura del sistema TAC Vista

## Siemens

La multinacional Siemens también ha desarrollado diversas soluciones y programas con el objetivo de aumentar la eficiencia energética en edificios. En concreto, actualmente ofrece los sistemas de

automatización de edificios Synco y Desigo. Synco es un sistema de control CVAC – Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado – simple y energéticamente eficiente para edificios multiuso de tamaño pequeño o mediano con funciones de ahorro energético. Por otro lado, Desigo está diseñado para edificios de mayor tamaño y cubre además el control de iluminación, persianas, seguridad, control de acceso y distribución de energía eléctrica.

Aparte de estos sistemas de automatización, Siemens ha desarrollado el sistema Symaro. En el sistema Symaro se emplean diferentes sensores que realizan mediciones de alta precisión, registran y transmiten lecturas de forma precisa y óptima de los sistemas CVAC permitiendo el ahorro en el consumo de energía y en los costes asociados.

Por último, otro de los sistemas desarrollados por Siemens es el Sistema de Gestión de Edificios GAMMA, basado en dispositivos que emplean el estándar domótico KNX para conseguir reducir los costes de energía en sistemas innovadores de gestión de edificios. En este tipo de sistemas se pueden incorporar sistemas inalámbricos – infrarrojos y sistemas de radio – que se conectan a los dispositivos KNX vía Gateways.

### 01 digital

Entre los servicios ofrecidos por la empresa 01 digital se encuentra el desarrollo e instalación de sistemas de automatización empleando productos KNX. Los sistemas pueden incluir una gran variedad de sensores y actuadores para el control de iluminación, persianas, sistemas de seguridad, gestión energética, CVAC, sistemas de supervisión y señalización, interfaces a servicios,...

Para el control del sistema de iluminación se realiza una instalación DALI – *Digital Adressable Lighting Interface* – sobre KNX, permitiendo realizar el control lumínico de manera digital. DALI permite realizar encendidos, apagados, regulación de intensidad, automatización de luminaria, creación de escenarios de iluminación, etc.

Entre los distintos sensores y actuadores KNX que instala 01 digital en sus sistemas destacan los dispositivos que permiten realizar el control y medición inteligente de la energía consumida: Control de cargas KNX y KES – KNX Energy Saver –. Con el Control de cargas se puede reducir el consumo de energía mediante la desconexión de ciertos dispositivos durante las puntas de carga de la red. Por otro lado, el medidor de consumos KES permite realizar mediciones inteligentes de consumo y

calcular el gasto mensual por aparato monitorizado. Si el hogar está automatizado el uso de este medidor de consumo permitirá la toma de decisiones automáticas y el apagado de dispositivos eléctricos para evitar consumos innecesarios o para evitar picos de consumo.

01 digital también ofrece otros modelos de dispositivos domóticos como son termostatos, pulsadores, control de alarmas, centrales meteorológicas, etc. Entre estos dispositivos destacan los programas de visualización de sistemas domóticos KNX para viviendas y hoteles y un video-portero IP de Mobotix integrable con KNX y accesible desde cualquier dispositivo móvil.

### Circutor

La compañía Circutor se dedica al diseño y fabricación de equipos para la eficiencia energética eléctrica. Dentro de la eficiencia energética, los campos de trabajo de Circutor son la protección eléctrica industrial, la medida y control de la energía eléctrica, los contadores inteligentes, la compensación de la energía reactiva y el filtrado de armónicos y la recarga eficiente de vehículos eléctricos.

Circutor propone el uso del software de gestión energética PowerStudio SCADA y la implantación de equipos de medida y una red de comunicaciones. Entre los equipos de medida con los que trabaja Circutor se encuentran analizadores de redes, contadores de energía, centralizadores de impulsos y telegestores energéticos.

Con el software PowerStudio SCADA se pueden obtener históricos de consumos y de variables energéticas, medir los usos significativos de energía, evaluar el consumo total frente al esperado, visualizar parámetros técnicos en tiempo real, realizar el control de costes energéticos, generar informes, realizar la integración con software de gestión general debido al servicios XML incorporado y acceso remoto. También permite la configuración de pantallas SCADA combinando diferentes parámetros de varios equipos.

En la Figura 10 se presenta un ejemplo de arquitectura diseñada por Circutor. En este caso se trata de un sistema descentralizado, con dispositivos localizados en diferentes salas. También incluye un sistema de baterías de condensadores para almacenar la energía reactiva de la instalación.

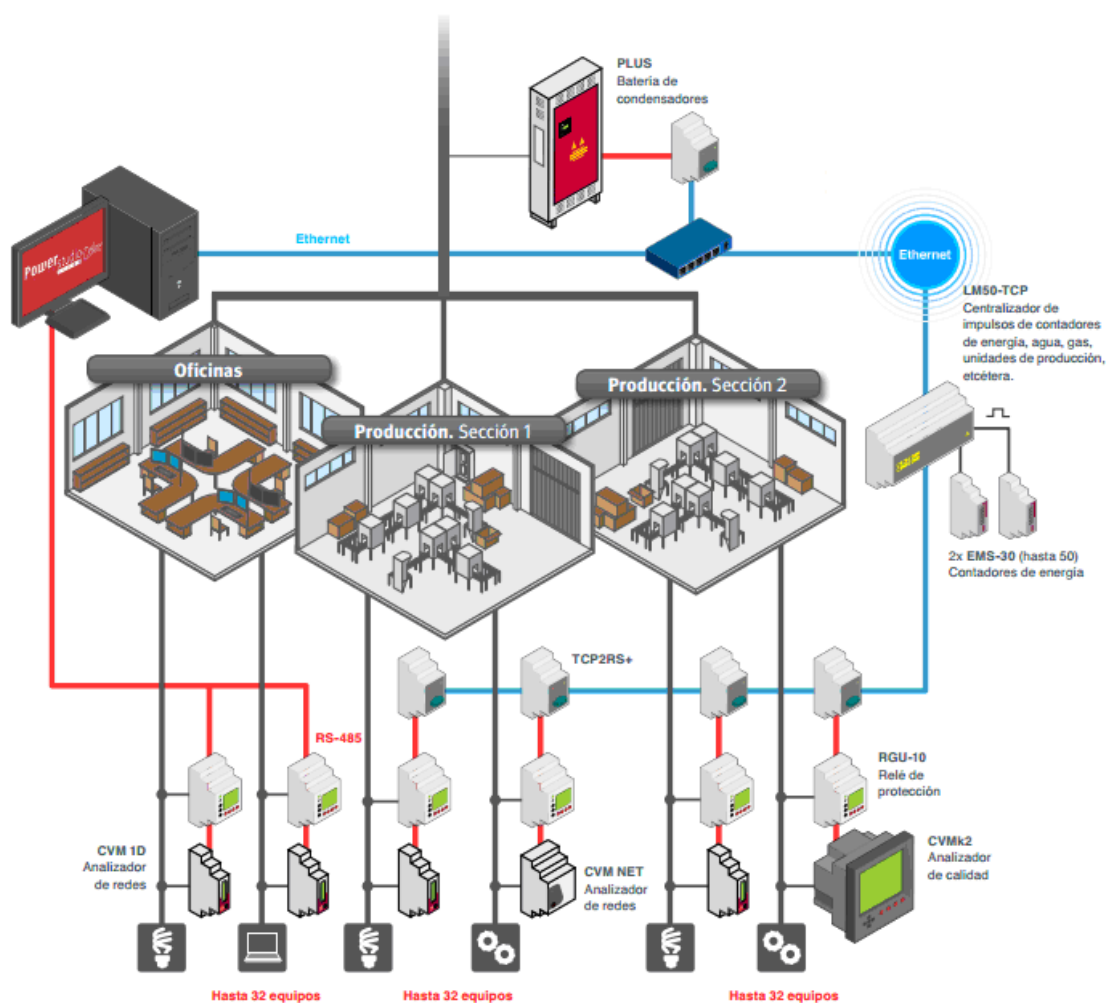


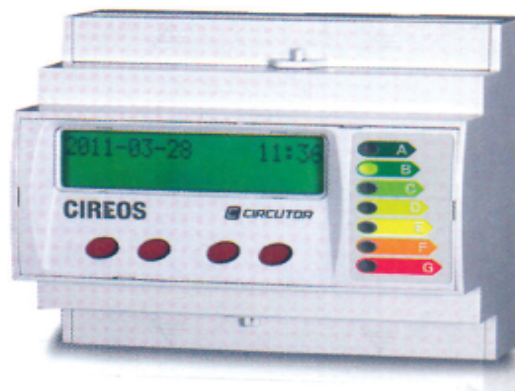
Figura 10. Ejemplo de arquitectura Circutor

Entre los dispositivos de eficiencia energética de Circutor destaca el gestor energético EDS y el indicador de eficiencia CIREOS. El dispositivo EDS o Efficiency Data Server – ver siguiente Figura – lleva incorporado el software PowerStudio Embedded con servidor Web integrado y permite consultar cualquier equipo de medida conectado a través de una conexión RS-485 in situ sin necesidad de ordenador. También está disponible un modelo de EDS dotado con un módem GPRS/3G.



*Figura 11. Efficiency Data Server*

En la siguiente Figura se muestra el dispositivo CIREOS, que verifica y clasifica el cumplimiento del nivel de eficiencia energética mediante la recopilación de parámetros – consumo de contadores de agua, gas, electricidad, combustibles líquidos, temperaturas, luminosidad,... –. Realiza la comparación con edificios patrón determinados como eficientes y ofrece el nivel de eficiencia según una clasificación similar a la utilizada en la certificación de aparatos eléctricos.



*Figura 12. CIREOS*

### Bilcoreficiency

Otra solución propuesta para el ahorro en el consumo de energía es la utilización del AEE – Ahorrador de Energía Eléctrica – de Bilcoreficiency. Este dispositivo almacena el excedente de energía durante los picos de tensión y después la entrega a la instalación eléctrica según la necesidad. En la Figura 13 se observa como el AEE es capaz de estabilizar y suavizar la señal eléctrica. Al almacenar la energía eléctrica no utilizada para evitar su pérdida se reduce la cantidad de electricidad suministrada y facturada.



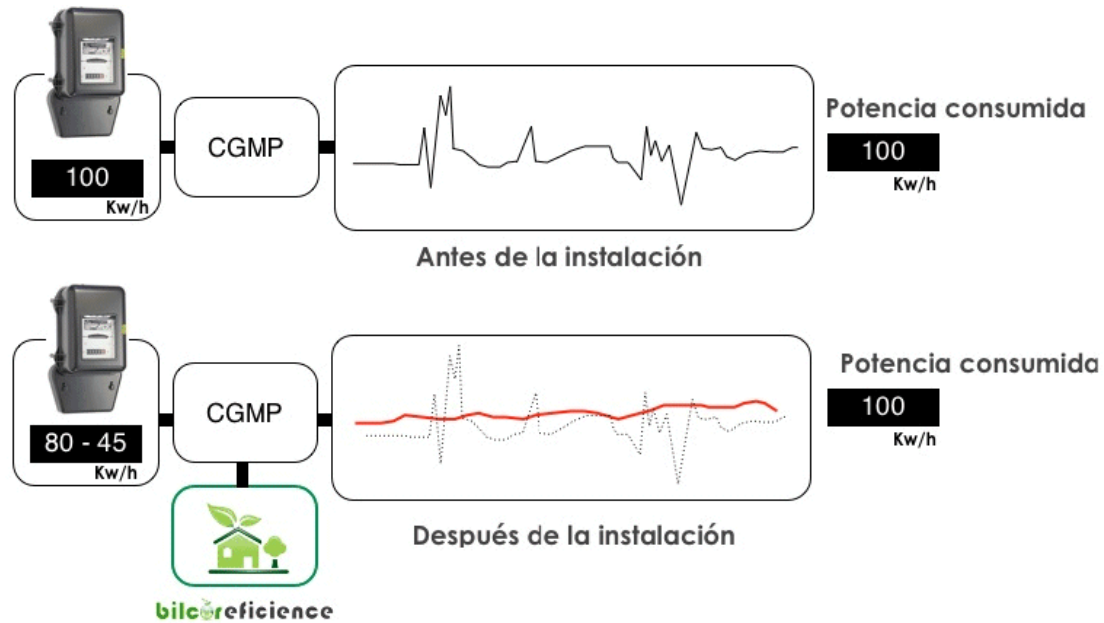


Figura 13. Potencia consumida con y sin el AEE

#### A.C.E. Power Energy

El A.C.E. Power Energy Trifásico es capaz de estabilizar la tensión de la red eléctrica a la que se encuentra conectado mediante el almacenamiento de más de 10 segundos de energía. Soporta desde la conexión de equipos con cargas de hasta 58 kW hasta equipos industriales con cargas de hasta 1000 kW.

Para el almacenamiento de energía emplea capacitores que pueden almacenar energía eléctrica de forma similar a una batería recargable. Debido a su diseño también realiza un filtrado de los armónicos de la señal y compensa la energía reactiva, evitando penalizaciones en la factura eléctrica, pérdidas de energía y protegiendo los equipos eléctricos de las fluctuaciones de la red.

## 2.4 CONCLUSIONES

Se ha observado un gran incremento en las publicaciones científicas de los últimos años en lo relacionado con las redes inalámbricas de sensores, intrínsecamente relacionadas con el horizonte de lo que se ha dado a conocer como Internet de las Cosas – Internet of Things, IoT – así como en las posibles aplicaciones de la tecnología en general y del IoT en particular en la mejora de la gestión del sistema de transporte y consumo eléctrico.

La Eficiencia Energética es de aplicación en cada uno de los puntos de todo el Sistema Eléctrico – Producción, Transporte, Consumo – y es en el último de ellos donde se centra este estudio. El sistema está altamente regulado, con estándares de medición para hacerlo accesible al público. Sin embargo, la tecnología asociada a su medición e incremento de control está en las primeras fases de desarrollo, con muy pocos sistemas en el mercado y una cobertura de este muy pequeña. En este sentido, la mayoría de dispositivos se centran en obtener mediciones – de punto o de vivienda/oficina en su totalidad – para concienciar al consumidor de forma continua y a través de su mejora de hábitos.

No hay muchas soluciones que aborden el problema de la mejora de la Eficiencia Energética de una forma activa y hasta la fecha ninguna que lo haga a través de sistemas generalistas con entradas y salidas tanto de Corriente Alterna como de Continua. Además, el uso de baterías para armonizar la curva de demanda en el punto final de la Red Energética no se ha explotado con claridad, utilizándose únicamente en sistemas aislados o como vector energético en sistemas alimentados a través de Energía Renovable.

## CAPÍTULO 3. DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA HARDWARE

En este capítulo se describe el análisis comparativo realizado para cada uno de los componentes que forman el sistema y la justificación de la selección de cada uno de ellos. Igualmente se describe el diseño del sistema final y la relación entre cada uno de sus componentes.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el prototipo que se ha desarrollado para el sistema de control energético estacionario, sistema compuesto principalmente por una red de sensores-actuadores inalámbricos – nodos o mota – y una unidad central con almacenamiento energético. Los nodos sensoriales de este prototipo se encuentran conectados entre las tomas de corriente y los dispositivos eléctricos, lo que les permite llevar la monitorización del consumo de forma individualizada y realizar o programar conexiones y desconexiones de los dispositivos eléctricos de manera remota. A su vez, estos nodos se comunican inalámbricamente a una unidad central de almacenamiento y control, que incluye un dispositivo inversor/cargador encargado de gestionar las pilas estacionarias y la potencia proporcionada al hogar , equipada con una pantalla táctil que permite interactuar con el sistema.

El sistema está compuesto por dos elementos principales, la Unidad Central y la red de sensores formada por nodos a los que denominamos Power Meter Actuator. A continuación se describen los distintos elementos que forman cada sistema y la relación existente entre ellos.

## 3.2 HARDWARE DE LA UNIDAD CENTRAL

La **Unidad Central** es el elemento clave del sistema, cuyo cometido es controlar y configurar todo el sistema, recibir los datos de medida, almacenar toda la información que será accesible bien por conexión directa a la unidad, mediante visualización en la pantalla táctil existente en el sistema, o a través de cualquier dispositivo con conexión a internet, ya que la Unidad Central está provista de acceso a internet mediante cable o WiFi, que le permite sincronizar la información con la nube. Incluye un sistema **Unidad de Control de Energía**, con un sistema de almacenamiento energético. Este dispositivo gestiona la carga del sistema de almacenamiento energético, así como su uso, cuando sea requerido, controlando la potencia total necesaria que se extrae del mismo. Así mismo, controla también la cantidad de potencia eléctrica que el hogar toma de la red eléctrica convencional y, en el caso de fallo o corte en la red proporcionada por el proveedor eléctrico, funciona como un Sistema de Alimentación Ininterrumpida – SAI -.

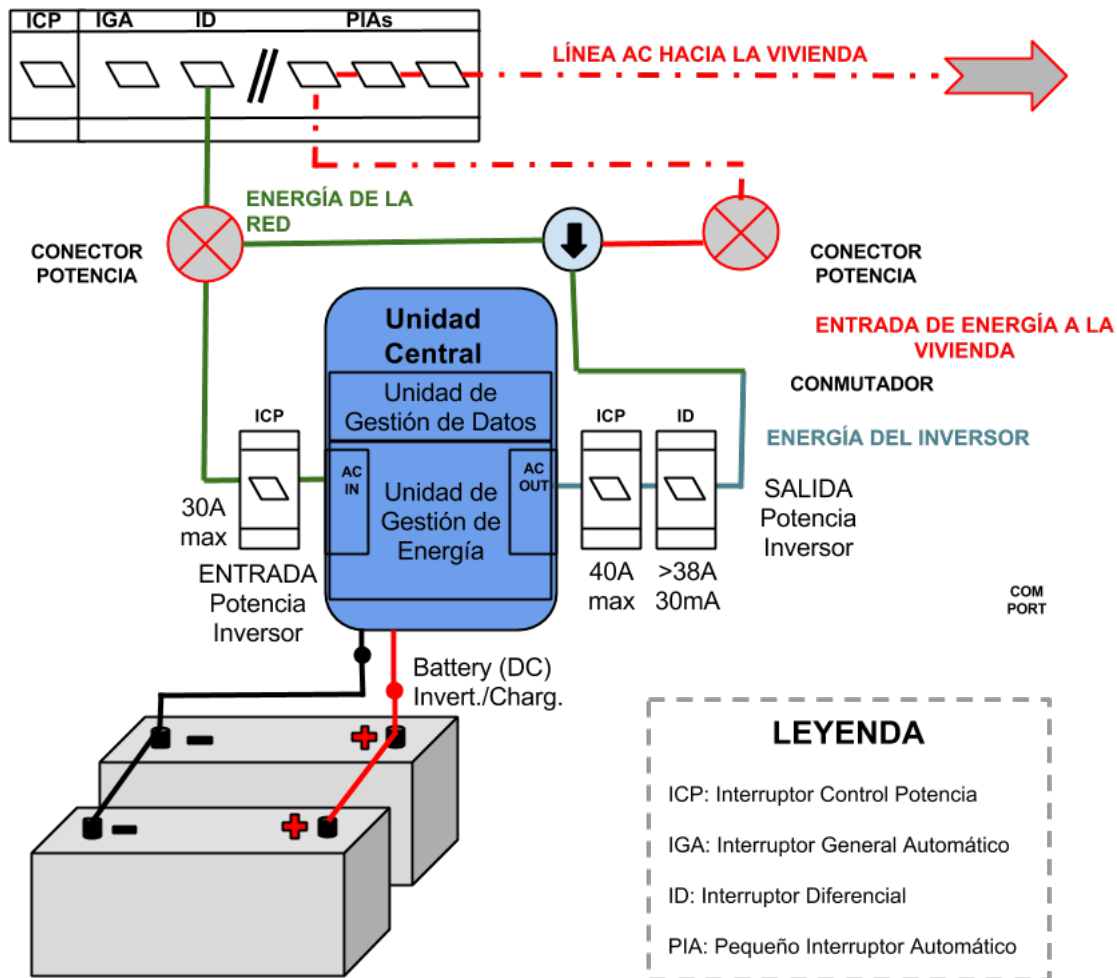


Figura 14. Esquema eléctrico del inversor y las baterías

A continuación se detallan cada uno de los componentes de la Unidad Central en detalle.

### 3.2.1 UNIDAD DE CONTROL DE ENERGÍA

Para el desarrollo del sistema se hizo necesario utilizar un dispositivo que funcionase como inversor de tensión y, a su vez, como cargador de las baterías, que componen el sistema de alimentación auxiliar. Existen diversos sistemas comerciales que cumplen con estas características, pero no todos ellos cuentan con la posibilidad de suplir la diferencia entre la potencia demandada y la proporcionada por la red eléctrica con la almacenada en las baterías, a esto lo denominamos *Modo Soprepotencia*.

El principio de funcionamiento del *Modo Sobrepotencia* consiste en suplir la demanda de intensidades de corriente superiores al máximo contratado al proveedor de suministros eléctricos. Por ejemplo, un

hogar determinado tiene un consumo medio por debajo de 10A, pero cuando se hace uso del termo y la vitrocerámica a la vez, el consumo se dispara a 18A, por lo que el usuario debe contratar una tarifa de 20A para no sufrir cortes de tensión en su hogar. Con este sistema, en lugar de ello, se contrata una tarifa que cubra las necesidades medias del hogar – 10A - y es el inversor el encargado de proporcionar esos 8 Amperios de margen necesarios en un momento determinado. Para ello, toma la energía que está almacenada en las baterías - corriente continua - y la transforma – invierte a corriente alterna- y la añade para poder ser utilizada en la red del hogar.

Otros requisitos necesarios son que el dispositivo cuente con una API programable bien documentada y una buena relación entre funcionalidad y rangos de potencia contra precio.

<b>Fabricante</b>	<b>TBS Electronics</b>	<b>Victron</b>	<b>Xantrex</b>
<b>Modelo</b>	<b>PS3000-12</b>	<b>C 12/2000/80</b>	<b>Freedom SW 2524</b>
<b>Potencia (W)</b>	2600	2000	2500
<b>Potencia Pico (W)</b>	5000	4000	5000
<b>Eficiencia</b>	92.00%	93.00%	90.00%
<b>Consumo (W)</b>	19	11	38
<b>Peso (Kg)</b>	18.5	12	23.9
<b>API Documentad</b>	Sí	Sí	N/A

*Figura 15. Comparación de las Unidades de Control de Energía estudiadas*

Finalmente se seleccionó el dispositivo **VICTRON Multiplus Compact 12/2000/8** – ver especificaciones en la Figura 16 – por su mayor eficiencia, su menor consumo y por ser más ligero.

MultiPlus	12 Volt 24 Volt 48 Volt	C 12/800/35 C 24/ 800/16	C 12/1200/50 C 24/1200/25	C 12/1600/70 C 24/1600/40	C 12/2000/80 C 24/2000/50	12/3000/120 24/3000/70 48/3000/35	24/5000/120 48/5000/70
PowerControl		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
PowerAssist		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Transfer switch (A)		16	16	16	30	16 or 50	100
INVERTER							
Input voltage range (V DC)		9,5 – 17 V		19 – 33 V	38 – 66 V		
Output		Output voltage: 230 VAC ± 2%			Frequency: 50 Hz ± 0,1% (1)		
Cont. output power at 25°C (VA) (3)		800	1200	1600	2000	3000	5000
Cont. output power at 25°C (W)		700	1000	1300	1600	2500	4500
Cont. output power at 40°C (W)		650	900	1200	1450	2200	4000
Peak power (W)		1600	2400	3000	4000	6000	10.000
Maximum efficiency (%)		92 / 94	93 / 94	93 / 94	93 / 94	93 / 94 / 95	94 / 95
Zero load power (W)		8 / 10	8 / 10	8 / 10	9 / 11	15 / 15 / 16	25 / 25
Zero load power in AES mode (W)		5 / 8	5 / 8	5 / 8	7 / 9	10 / 10 / 12	20 / 20
Zero load power in Search mode (W)		2 / 3	2 / 3	2 / 3	3 / 4	4 / 5 / 5	5 / 6
CHARGER							
AC Input		Input voltage range: 187-265 VAC		Input frequency: 45 – 65 Hz		Power factor: 1	
Charge voltage 'absorption' (V DC)		14,4 / 28,8 / 57,6					
Charge voltage 'float' (V DC)		13,8 / 27,6 / 55,2					
Storage mode (V DC)		13,2 / 26,4 / 52,8					
Charge current house battery (A) (4)		35 / 16	50 / 25	70 / 40	80 / 50	120 / 70 / 35	120 / 70
Charge current starter battery (A)		4 (12 V and 24 V models only)					
Battery temperature sensor		yes					
GENERAL							
Auxiliary output (5)		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Yes (16A)	Yes (25A)
Programmable relay (6)		Yes					
Protection (2)		a - g					
VE.Bus communication port		For parallel and three phase operation, remote monitoring and system integration					
General purpose com. port		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	Yes	Yes
Remote on-off		Yes					
Common Characteristics		Operating temp. range: -40 to +50°C (fan assisted cooling) Humidity (non-condensing): max 95%					
ENCLOSURE							
Common Characteristics		Material & Colour: aluminium (blue RAL 5012)			Protection category: IP 21		
Battery-connection		battery cables of 1,5 meter			M8 bolts	Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)	
230 V AC-connection		G-ST18i connector			Spring-clamp	Screw terminals 13 mm² (6 AWG)	
Weight (kg)		10	10	10	12	18	30
Dimensions (hwxwd in mm)		375x214x110			520x255x125	362x258x218	444x328x240
STANDARDS							
Safety		EN-IEC 60335-1, EN-IEC 60335-2-29, IEC 62109-1					
Emission, Immunity		EN 55014-1, EN 55014-2, EN 61000-3-3, EN 61000-6-3, EN 61000-6-2, EN 61000-6-1					
Automotive Directive		2004/104/EC					
Anti-islanding		See our website					
1) Can be adjusted to 60 Hz; 120 V 60 Hz on request 2) Protection key: a) output short circuit b) overload c) battery voltage too high d) battery voltage too low e) temperature too high f) 230 VAC on inverter output g) input voltage ripple too high		3) Non-linear load, crest factor 3:1 4) At 25°C ambient 5) Switches off when no external AC source available 6) Programmable relay that can a.o. be set for general alarm, DC under voltage or genset start/stop function AC rating: 230 V/4A DC rating: 4 A up to 35 VDC, 1 A up to 60 VDC					

Figura 16. Especificaciones Serie Victron MultiPlus

Para complementar el equipo, se adquirió también una unidad de comunicaciones que adapta la interfaz propia del dispositivo al protocolo USB, que le permite poder ser configurado desde un simple PC con el sistema operativo Windows y el software de configuración aportado por el fabricante. Sin embargo, con ayuda de esta unidad y del trabajo de software realizado, la configuración y lectura de los datos y variables aportados por el inversor se realizan desde una *unidad central de datos y control* instalada en un mini PC dotado con una variante del SO Linux, de la cual hablaremos a continuación.

### 3.2.2 BATERÍAS

Se realizó un análisis comparativo entre las distintas baterías, descartando inicialmente las baterías de litio fundamentalmente por su elevado coste actual.



## COMPARATIVA BATERÍAS

Baterías (150Ah)	Tipo	Ah	Coste	Volumen (m3)	Area (m2)	Peso (Kg)	Ciclos (60%)	Kg/Ah	Coste/Ah	Ah/Volumen	Ah/area (superficie suelo)	Coste/ Ciclos	Peso(kg)/ superficie(m2)	Largo(L)	Ancho(w)	Alto(H)	Ciclos (20%)	Ciclos (80%)
Bateria 150Ah Mastervolt	AGM	150	230	0,0213	0,0970	42	500	0,2800	1,5333	7.032,1708	1.547,0776	0,4600	433,1817	513	189	220	1000	400
12-3OPZS150	Opzs	150	588,5	0,0305	0,0779	69	1500	0,4600	3,9233	4.912,1060	1.925,5456	0,3923	885,7510	380	205	392		1200
6-3OPZS150 -Serie	Opzs	150	588	0,0535	0,1273	93,42	2000	0,6228	3,9200	2.805,3450	1.178,2449	0,2940	733,8109	103	1236	420		1500

Baterías (220-300Ah)	Tipo	Ah	Coste	Volumen (m3)	Area (m2)	Peso (Kg)	Ciclos (60%)	Kg/Ah	Coste/Ah	Ah/Volumen	Ah/area (superficie suelo)	Coste/ Ciclos	Peso(kg)/ superficie(m2)	Largo(L)	Ancho(w)	Alto(H)	Ciclos (20%)	Ciclos (80%)
2-Bateria 150Ah Mastervolt	AGM	300	460	0,0427	0,1939	84	500	0,2800	1,5333	7.032,1708	1.547,0776	0,9200	433,1817	513	378	220	1000	400
2-12-3OPZS150	Opzs	300	1177	0,0611	0,1558	138	1500	0,4600	3,9233	4.912,1060	1.925,5456	0,7847	885,7510	380	410	392		1200
12-3OPZS150 - 6Serie2paralelo	Opzs	300	1176	0,1069	0,2546	186,84	2000	0,6228	3,9200	2.805,3450	1.178,2449	0,5880	733,8109	103	2472	420		1500
6-3OPZSV250-Serie 6-BAE 4 PVS	Opzs	250	588	0,0644	0,1533	132	2000	0,5280	2,3520	3.883,7437	1.631,1724	0,2940	861,2590	124	1236	420		1500
280(Teknosolar)Serie 6-BATERIA HOPPECKE 4 OPZS 200 280AhSerie	Opzs	280	596,4	0,0550	0,1310	117	2200	0,4179	2,1300	5.087,5051	2.136,7521	0,2711	892,8571	105	1248	420	7500	1400
Bateria Gel Victron Energy 12v 220Ah	GEL	220	529	0,0298	0,1242	63	650	0,2864	2,4045	7.378,4303	1.770,8233	0,8138	507,0994	522	238	240	1400	450
6-Bateria Opzv Hawker 2v 4-OPZV-200 273A C/120 UP-SF250	Opzv	273	1140	0,0513	0,1273	117	1500	0,4286	4,1758	5.321,1059	2.144,4057	0,7600	919,0310	103	1236	403	6000	1200
	AGM	250	340	0,0513	0,1419	59,5	500	0,2380	1,3600	4.872,8076	1.761,4069	0,6800	419,2148	518	274	242	1200	450

Baterías (500-750Ah)	Tipo	Ah	Coste	Volumen (m3)	Area (m2)	Peso (Kg)	Ciclos (60%)	Kg/Ah	Coste/Ah	Ah/Volumen	Ah/area (superficie suelo)	Coste/ Ciclos	Peso(kg)/ superficie(m2)	Largo(L)	Ancho(w)	Alto(H)	Ciclos (20%)	Ciclos (80%)
4-Bateria 150Ah Mastervolt	AGM	600	920	0,0853	0,3878	168	500	0,2800	1,5333	7.032,1708	1.547,0776	1,8400	433,1817	513	756	220	1000	400
4-12-3OPZS150	Opzs	600	2354	0,1221	0,3116	276	1500	0,4600	3,9233	4.912,1060	1.925,5456	1,5693	885,7510	380	820	392		1200
24-3OPZS150 - 6Serie4paralelo	Opzs	600	2352	0,2139	0,5092	373,68	2000	0,6228	3,9200	2.805,3450	1.178,2449	1,1760	733,8109	103	4944	420		1500
12-3OPZSV250 - 6Serie2paralelo	Opzs	500	1176	0,1287	0,3065	264	2000	0,5280	2,3520	3.883,7437	1.631,1724	0,5880	861,2590	124	2472	420		1500
18-3OPZSV250 - 6Serie3paralelo	Opzs	750	1764	0,1931	0,4598	396	2000	0,5280	2,3520	3.883,7437	1.631,1724	0,8820	861,2590	124	3708	420		1500
12-BAE 4 PVS 280- 6Serie2paralelo	Opzs	560	1192,8	0,1101	0,2621	234	2200	0,4179	2,1300	5.087,5051	2.136,7521	0,5422	892,8571	105	2496	420	7500	1400
12-BATERIA HOPPECKE 4 OPZS 200 280AhSerie2paralelo	Opzs	560	1381,92	0,1101	0,2621	210	2000	0,3750	2,4677	5.087,5051	2.136,7521	0,6910	801,2821	105	2496	420	6000	1500
3-Bateria Gel Victron Energy 12v 220Ah	GEL	660	1587	0,0894	0,3727	189	650	0,2864	2,4045	7.378,4303	1.770,8233	2,4415	507,0994	522	714	240	1400	450
12-Bateria Opzv Hawker 2v 4-OPZV-200 273A C/120)6Serie2paralelo	Opzv	546	2280	0,1026	0,2546	234	1500	0,4286	4,1758	5.321,1059	2.144,4057	1,5200	919,0310	103	2472	403	6000	1200
2-UP-SF250	AGM	500	680	0,0687	0,2839	119	500	0,2380	1,3600	7.278,5408	1.761,4069	1,3600	419,2148	1036	274	242	1200	450

Figura 17. Comparativa de distintas configuraciones de Baterías

Para la selección de las baterías, se han tenido en cuenta parámetros tales como las dimensiones, peso, cantidad de ciclos, coste y seguridad. Se han realizado un estudio comparativo obteniendo ratios entre los principales parámetros para obtener el sistema de almacenamiento energético más rentable y confiable. Se han tenido en cuenta tres sistemas de almacenamiento distinto: de GEL, OPzS y AGM – *Absortion Glass Mat* –.

Los sistemas de GEL son baterías tipo plomo-ácido selladas con electrolito no líquido, se han descartado por su elevado precio. Aunque tienen una tasa de corriente elevada y un buen ratio energía almacenada contra volumen y peso.

El sistema OPzS – O de Estacionario, Pz de Plomo tubular y S de electrolito líquido – tiene el inconveniente de que no está sellada, por lo que necesita tareas de mantenimiento con más periodicidad que los sistemas sellados. Además los ratios de almacenamiento por volumen y peso son demasiado bajos y su tasa de entrega de corriente no es muy alta. Como principal ventaja tenemos la cantidad de ciclos que soporta aún cuando se produce descargar muy grandes.

Por último tenemos las baterías de ácido de plomo selladas de tipo AGM. Pueden suministrar corrientes elevadas en cortos periodos de tiempo – arranques –, así como por tener un bajo índice de autodescarga y permitir una recarga rápida. Tienen unos parámetros muy parecidos a las baterías de GEL pero su coste es mucho menor.

Se han dispuesto dos baterías idénticas de **UP-SP250** de 250Ah conectadas en paralelo, para aumentar la capacidad total del sistema y disponer de una mayor reserva de energía. La dimensión de la misma se ha calculado para que no deban operar nunca por debajo del 80% de su carga nominal, es decir que entreguen como mucho 100Ah, esto es 2,4kWh.

### 3.2.3 SISTEMA DE GESTIÓN DE DATOS E INTERFAZ FÍSICA

El Sistema de Gestión de Datos se encuentra en un miniPC que permanece activo permanentemente, monitoreando y controlando el sistema. Además, se encarga de mostrar la información relevante en la pantalla táctil, con formato sencillo de comprender para el usuario.

La selección del miniPC para la aplicación se realizó basándose en la capacidad de procesamiento del mismo – debía ser capaz de albergar el complejo sistema y de almacenar los datos –, su consumo – a tener en cuenta ya que estaría activo indefinidamente – y su tamaño. Los dispositivos estudiados fueron la BeagleBone Black, el Arduino UNO, el APC ROCK y la Raspberry Pi, los cuales podemos ver comparados en la siguiente tabla.

*Tabla 4. Comparativa miniPCs*

	<i>Arduino UNO</i>	<i>APC ROCK</i>	<i>RaspberryPi B+</i>	<i>BeagleBone Black</i>
Procesador	ATmega 328	ARM Cortex-A9 @800 MHz	ARM1176JZF-S @700MHz	ARM Cortex-A8@1 GHz
Sistema Operativo	IDE de Arduino ©	Firefox OS / Android	Linux	Linux
Tamaño	↓	↑	↓	↓
Consumo – W –	~0.5	12	3	2
Precio – € –	23	55	32	39

Atendiendo a la tabla anterior se observa que *Arduino UNO* tiene un procesador con baja potencia de procesamiento para las aplicaciones que debe soportar. En cuanto al *APC ROCK* tiene un tamaño excesivo para las capacidades que ofrece. En ambos casos el hecho de no tener un sistema Linux complicaba además el desarrollo sobre los mismos e impedía la reutilización de numerosas librerías Open Source.

Acabaron siendo comparados por precio la Raspberry Pi y el BeagleBone Black, los cuales son muy similares en características, siendo la **Raspberry Pi B+** algo más económica, cumpliendo satisfactoriamente con las expectativas de procesamiento y consumo, por lo que acabó siendo elegida.

La unidad va conectada a la Unidad de Control de Energía – UCE – mediante una interfaz propia a través del puerto USB del miniPC. A través de esta conexión le envía a la UCE los parámetros de configuración y recibe de ella los datos relevantes al estado del sistema – modo de funcionamiento, estado de la red, carga de las baterías, etc. –. Por otro lado, la unidad se conecta a la Main Board también a través del puerto USB, lo cual la dota de comunicación inalámbrica a través del estándar ZigBee y mediante el protocolo IPv6. Mediante esta comunicación, recibe los datos de consumo – corriente, tensión, factor de potencia, etc. – medidos por las motas operadoras del sistema y a su vez, les envía los mensajes de control – activación/desactivación – de los dispositivos eléctricos.

La unidad lleva instalada una tarjeta SD, que actúa como unidad de almacenamiento de la información obtenida, en forma de BBDD, que incluye reportes de consumos, configuraciones, estados... Toda esta información es accesible mediante la conexión al miniPC – por parte de la unidad técnica –, pero además, los datos más relevantes para el usuario son mostrados en una pequeña pantalla táctil. La pantalla fue seleccionada por su compatibilidad y simplicidad de conexión con el mini PC a través de uno de sus puertos.

Adicionalmente, la unidad está dotada de acceso a internet mediante la conexión del mini PC a la red mediante WiFi. De esta manera, los datos se sincronizan con la nube para facilitar el acceso a los mismos de manera remota, desde un PC conectado a internet o incluso mediante dispositivos móviles como smartphones o tablets. El sistema remoto de acceso también permite el control del sistema mediante la activación/desactivación de aquellos dispositivos eléctricos que estén dotados de una Actor Board.

Por último, la clave para la selección de la interfaz de usuario táctil fue el reducido tamaño y la sencillez de su programación. El modelo elegido fue el **uLCD32PTU** de la compañía 4D Systems, en la siguiente figura se puede apreciar una imagen del mismo.



*Figura 18. Pantalla táctil modelo uLCD32PTU*

### 3.3 HARDWARE DEL POWER METER ACTUATOR

Por otro lado tenemos la Red Inalámbrica de Sensores – **WSN**, por sus siglas en inglés **Wireless Sensor Netowrk** –. Cada nodo o mota de esta red es un **Power Meter Actuator – PMA** - pudiendo existir un diverso número de ellas en el sistema, dependiendo de la cantidad de dispositivos a monitorizar. Un **PMA** está formado por una **Main Board**, conectadas físicamente a su vez a una **Sensor Board** y a una **Actor Board**. La primera de estas realiza la función de leer y digitalizar los niveles de corriente y tensión consumidos por el dispositivo/punto en el que se encuentre instalada. La segunda, ejecuta las acciones de conexión/desconexión de los dispositivos eléctricos, mediante el uso de relés. Por otro lado, encontramos una **PMA** cuya función es actuar como **Gateway**, y recibe este nombre también, dotando a la **Unidad Central** de conectividad ZigBee para enviar y recibir mensajes hacia y desde las otras **PMAs**. Esta **PMA** sólo está compuesta por una **Main Board**.

A continuación se describen los tres sistemas que se detallan a continuación:

#### 3.3.1 MAIN BOARD

##### 3.3.1.1 Selección de Protocolo de Comunicaciones

Siguiendo la filosofía definida por el “Internet de las Cosas” – *Internet of Things* –, que pretende interconectar objetos cotidianos y hacerlos accesibles desde Internet, se asignará a cada nodo una dirección IP empleando el protocolo IPv6. Sin embargo, para las comunicaciones entre los nodos sensores y la Unidad Central se ha estudiado el uso de comunicaciones inalámbricas y cableadas. En la siguiente Tabla se presenta una comparativa de algunos de los estándares que pueden utilizarse.

*Tabla 5. Comparativa de protocolos de comunicación para redes de sensores*

	<b><i>PLC – Power Line Communications –</i></b>	<b><i>IEEE 802.11</i></b>	<b><i>IEEE 802.15.4 – Dispositivo propio –</i></b>
<b>Tasa binaria</b>	~100 Mbps	54 Mbps	250 kbps
<b>Consumo</b>	< 6W	700 mW	77 mW

<b>Distancia</b>	100-300 m	50-100 m	10-100 m
<b>Precio</b>	50 – 150 € – según prestaciones –	~45 €	~25 €

### Power Line Communication

*Power Line Communication* – PLC – o Comunicaciones mediante cable eléctrico son un conjunto de tecnologías de acceso que permiten emplear las líneas de energía eléctrica convencionales para transmitir señales de radio para propósitos de comunicación. Consiste en la modulación de una señal portadora cuya frecuencia oscila entre 20 y 200 kHz modulada por señales digitales que permite la transmisión de datos a alta velocidad e incluso puede emplearse como sustitución de las redes Ethernet para la transmisión de Internet mediante banda ancha.

Para el uso de esta tecnología es muy importante el estado de las líneas eléctricas. Si las redes están deterioradas, los cables se encuentran en mal estado o tienen empalmes mal hechos no es posible utilizar esta tecnología. Además, normalmente se producen reducciones en la tasa binaria cuando se pone en funcionamiento algún electrodoméstico de alto consumo como la lavadora o el aire acondicionado.

### IEEE 802.11

También existe la posibilidad de utilizar el estándar IEEE 802.11 o Wi-Fi para redes de área local inalámbricas – WLANs, *Wireless Local Area Networks* –. Este estándar fue diseñado para sustituir el equivalente inalámbrico para las capas físicas y MAC de la norma 802.3 – Ethernet –. Permite crear redes de área local inalámbricas de alta velocidad siempre y cuando el equipo que se vaya a conectar no esté muy alejado del punto de acceso. Admite cualquier tipo de dispositivo de alta velocidad con propiedades de conexión también de alta velocidad dentro de un radio de varias docenas de metros en ambientes cerrados – de 20 a 50 metros en general – o dentro de un radio de cientos de metros al aire libre.

IEEE 802.11 es el primer estándar y permitía un ancho de banda de 1 a 2 Mbps. No obstante, este estándar ha sido modificado para optimizar el ancho de banda o para especificar componentes de nuevo con el fin de garantizar mayor seguridad o compatibilidad. Según la versión se emplea la banda

de 2,4 o 5 GHz y la última versión para este estándar es la 802.11ac y se está trabajando en la 802.11ad. No obstante, actualmente la mayoría de dispositivos trabajan con la versión 802.11g y la versión 802.11n.

#### IEEE 802.15.4

Otro estándar que se puede emplear para las comunicaciones entre los nodos y el Centro de Datos es el estándar IEEE 802.15.4 (“IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4,” 2011) para redes inalámbricas. En el estándar IEEE 802.15.4 el consumo de los nodos en transmisión varía entre 10 y 30 mA dependiendo del nivel de potencia empleado, y la comunicación se realiza con una transferencia máxima de 250 Kbit/s. IEEE 802.15.4 utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos; en concreto 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos para redes inalámbricas de sensores se opta generalmente por la banda de 2,4 GHz por ser libre en todo el mundo.

Al utilizar IPv6 sobre IEEE 802.15.4 sería necesario emplear el estándar 6LoWPAN – *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks* (E. Shelby et al., 2012)– que define las compresiones de cabeceras, la fragmentación y el re-ensamblado necesarios para la adaptación de los paquetes. Esta adaptación es necesaria debido a que la cabecera TCP/IP es demasiado grande para IEEE 802.15.4 y porque IPv6 admite que la máxima unidad de transferencia sea como mínimo de 1280 Bytes, mientras que en el estándar IEEE 802.15.4 es el tamaño de un paquete estándar es de 127 Bytes. Esta capa de adaptación también se encarga tanto del encaminamiento de los paquetes dentro de la red IP local como del encaminamiento hacia redes IP externas, de las lecturas de estados de los nodos vecinos y del soporte para la transmisión *multicast*.

Teniendo en cuenta el bajo consumo que ofrece el estándar **IEEE 802.15.4**, y sabiendo que la velocidad y rango de alcance que aporta son más que suficientes para la aplicación que ocupa, se ha decidido usar esta opción para las comunicaciones.

#### Gateway

El sistema además necesita incorporar un **Gateway** para la comunicación con la Unidad Central. Este dispositivo será un nodo encargado de encaminar la información obtenida por los sensores hacia la Unidad Central para que esta los almacene y los transmita a la nube y de enviar las órdenes o cambios de configuración procedentes del Unidad Central hacia los nodos sensores.

En el Gateway no se realizará ningún tipo de procesamiento de la información, simplemente actuará como retransmisor de datos o enlace entre la red de sensores y la Unidad Central que hará visible a la red desde Internet.

### 3.3.1.2 Componentes de la Main Board

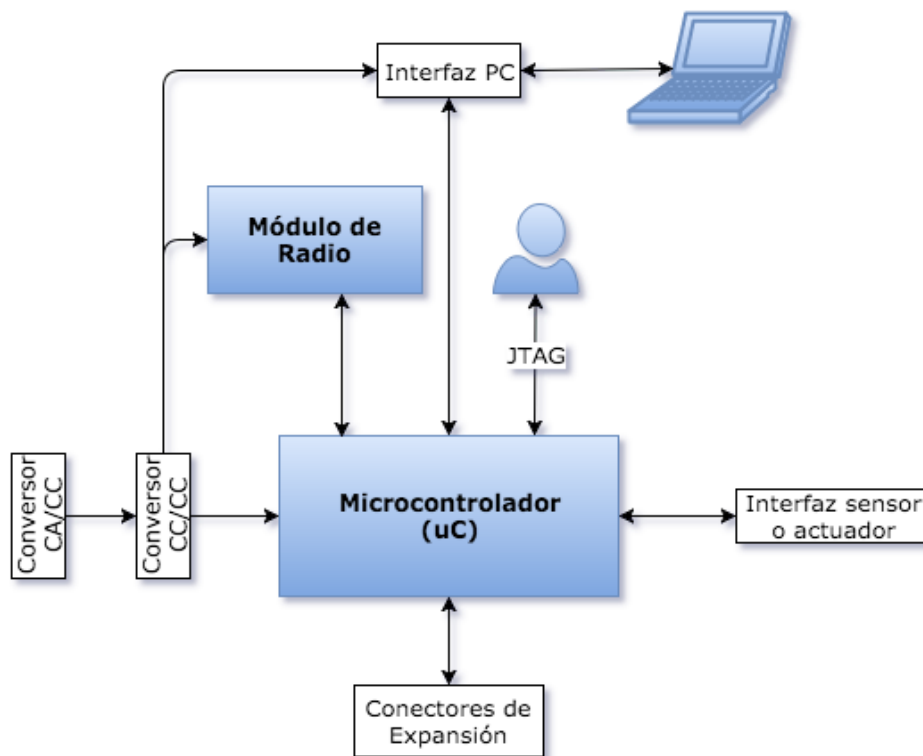


Figura 19. Diagrama de bloques Main board

La **Main board** dependiendo de su posición en el sistema tiene las funciones de, por una parte, dotar a la Unidad Central de conectividad con la red de sensores local y, por otra, procesar y enviar los datos adquiridos por la Sensor Board. Es por ello que el componente principal de esta placa es el **system-on-chip CC2538** de Texas Instruments, sistema que incluye un microcontrolador y un módulo de radio en el mismo circuito integrado. El microcontrolador trabaja a una frecuencia de reloj de 32MHz y está basado en la arquitectura *ARM Cortex M3*, combinado con una memoria RAM de hasta 32 KBytes y una memoria FLASH de hasta 512 Kbytes.



## CC2538 Powerful Wireless Microcontroller System-On-Chip for 2.4-GHz IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, and ZigBee® Applications

### 1 Device Overview

#### 1.1 Features

- Microcontroller
  - Powerful ARM® Cortex®-M3 With Code Prefetch
  - Up to 32-MHz Clock Speed
  - 512KB, 256KB or 128KB of In-System-Programmable Flash
  - Supports On-Chip Over-the-Air Upgrade (OTA)
  - Supports Dual ZigBee Application Profiles
  - Up to 32KB of RAM (16KB With Retention in All Power Modes)
  - cJTAG and JTAG Debugging
- RF
  - 2.4-GHz IEEE 802.15.4 Compliant RF Transceiver
  - Excellent Receiver Sensitivity of -97 dBm
  - Robustness to Interference With ACR of 44 dB
  - Programmable Output Power up to 7 dBm
- Security Hardware Acceleration
  - Future Proof AES-128/256, SHA2 Hardware Encryption Engine
  - Optional – ECC-128/256, RSA Hardware Acceleration Engine for Secure Key Exchange
  - Radio Command Strobe Processor and Packet Handling Processor for Low-Level MAC Functionality
- Low Power
  - Active-Mode RX (CPU Idle): 20 mA
  - Active-Mode TX at 0 dBm (CPU Idle): 24 mA
  - Power Mode 1 (4-μs Wake-Up, 32-KB RAM Retention, Full Register Retention): 0.6 mA
  - Power Mode 2 (Sleep Timer Running, 16-KB RAM Retention, Configuration Register Retention): 1.3 μA
  - Power Mode 3 (External Interrupts, 16-KB RAM Retention, Configuration Register Retention): 0.4 μA
  - Wide Supply-Voltage Range (2 V to 3.6 V)
- Peripherals
  - μDMA
  - 4 × General-Purpose Timers (Each 32-Bit or 2 × 16-Bit)
  - 32-Bit 32-kHz Sleep Timer
  - 12-Bit ADC With 8 Channels and Configurable Resolution
  - Battery Monitor and Temperature Sensor
  - USB 2.0 Full-Speed Device (12 Mbps)
  - 2 × SPI
  - 2 × UART
  - I2C
  - 32 General-Purpose I/O Pins (28 × 4 mA, 4 × 20 mA)
  - Watchdog Timer
- Layout
  - 8-mm × 8-mm QFN56 Package
  - Robust Device for Industrial Operation up to 125°C
  - Few External Components
  - Only a Single Crystal Needed for Asynchronous Networks
- Development Tools
  - CC2538 Development Kit
  - Reference Design Certified Under FCC and ETSI Regulations
  - Full Software Support for Contiki/6LoWPAN, Smart Grid, Lighting, and ZigBee Home Automation With Sample Applications and Reference Designs Available
  - Code Composer Studio™
  - IAR Embedded Workbench® for ARM
  - SmartRF™ Studio
  - SmartRF Flash Programmer

*Figura 20. Principales características del CC2538*

El módulo de radio es un transceptor que opera en la banda 2,4GHz, compatible con el protocolo IEEE 802.15.4, base sobre la que se define la especificación de ZigBee (“The ZigBee Alliance | Control your World,” n.d.), con una sensibilidad de -97 dBm, potencia de salida programable de hasta 7 dBm y una velocidad máxima de transmisión de 250 Kbps.

Una de las características principales de la placa Main Board es su reducido tamaño, gracias a la utilización del comentado *system-on-chip* CC2538 de Texas Instruments. La comunicación inalámbrica se realiza mediante el estándar 6LoWPAN que posibilita el uso de IPv6 sobre el estándar IEEE 802.15.4. El principal objetivo del estándar es lograr el uso de IPv6 en redes de sensores inalámbricas

- WSNs, Wireless Sensor Networks - de bajo consumo, permitiendo de esta manera que dispositivos de reducidas dimensiones con una capacidad de procesamiento limitado, puedan lograr una amplia conectividad.

La Main Board también consta de una interfaz RS-232, JTAG y varios conectores de expansión que permiten la comunicación con los dispositivos externos. Esta serie de conexiones le permiten comunicarse con la Unidad Central y con la Actor Board, para enviar y recibir mensajes. Además, proporcionan a la unidad técnica una comunicación para mantenimiento y configuración de la placa.

Como se puede apreciar en las siguientes figuras, además de estos dispositivos, se han incluido en la Main Board un convertor DC/DC y otro convertor AC/DC, debido a que en lugar de emplear baterías se ha utilizado la señal eléctrica del hogar como fuente alimentación de la placa. En la siguiente figura se muestra el esquemático de la Main Board con sus entradas y salidas correspondientes.

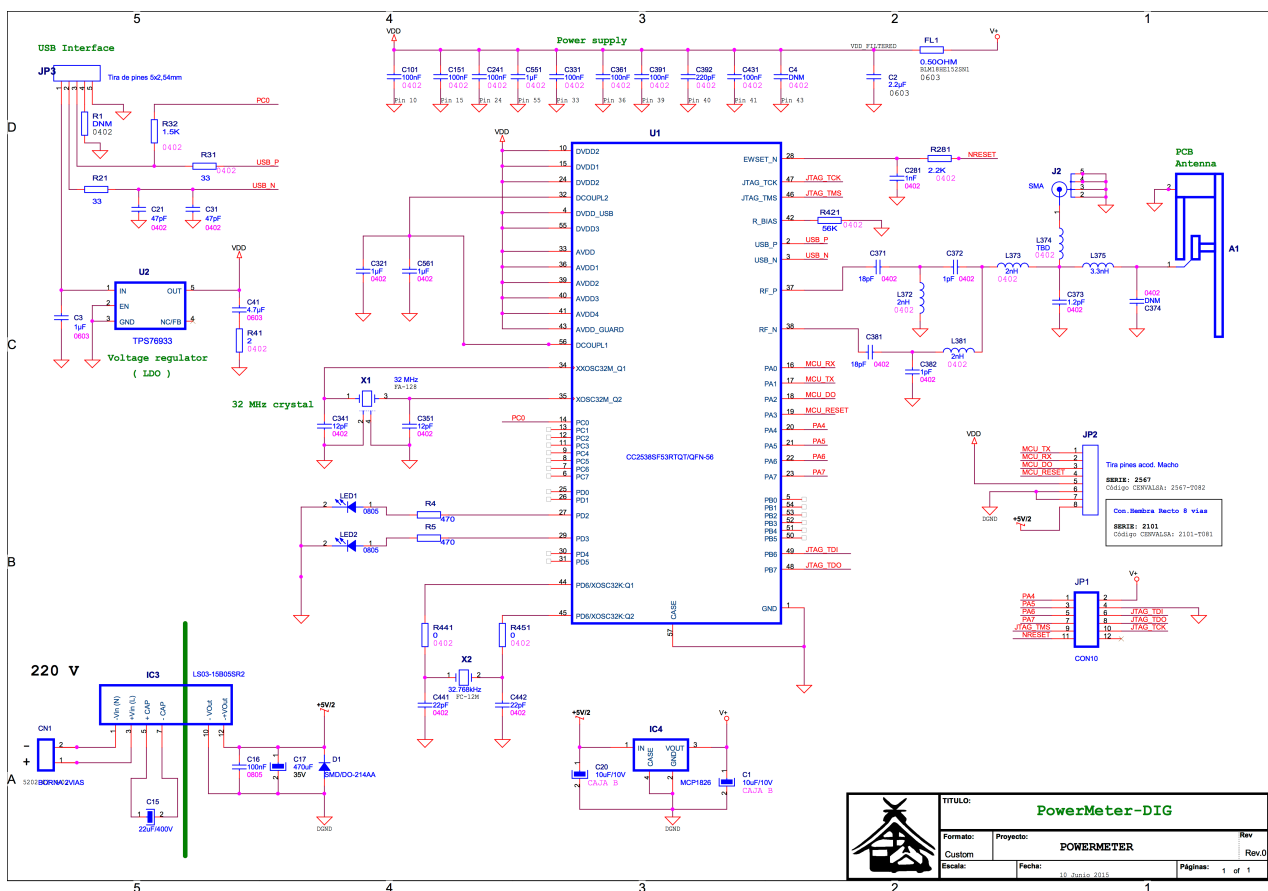
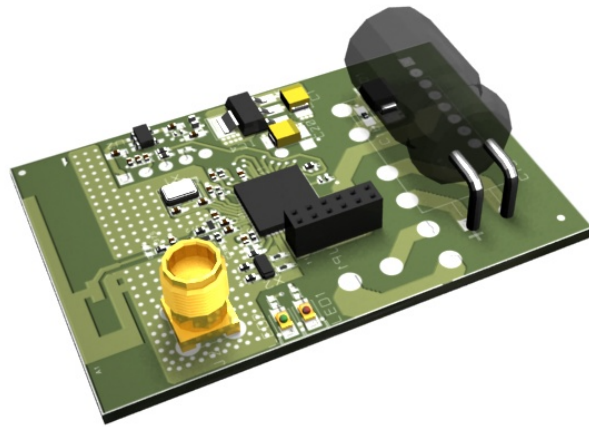
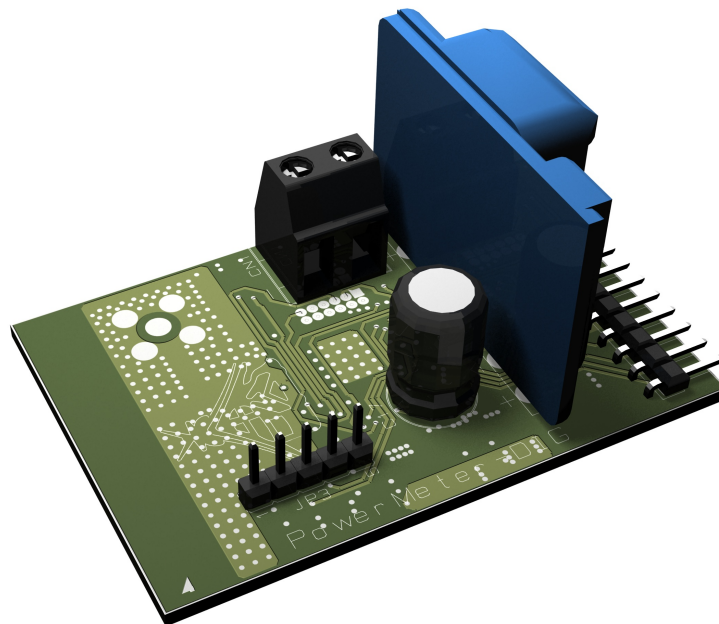


Figura 21. Esquemático de la Main Board



*Figura 22. Representación del Anverso de la Main Board completa*



*Figura 23. Representación del Reverso de la Main Board completa*

### 3.3.2 SENSOR BOARD

Constituye la interfaz de sensores encargada de medir las señales de potencia que consume el punto del hogar medido y de su posterior acondicionamiento para la comunicación con la Main

board. La Sensor Board es implementada en una PCB que se encuentra separada de la Main Board para evitar perturbaciones en las señales que se desean medir – señales de potencia – que deben ser acondicionadas y medidas con especial cuidado, para evitar que lleguen a inutilizar la Main Board o que impida su correcto funcionamiento, debido a derivaciones o acoplamientos que puedan sufrir las señales de procesamiento o radio con las líneas de potencia.

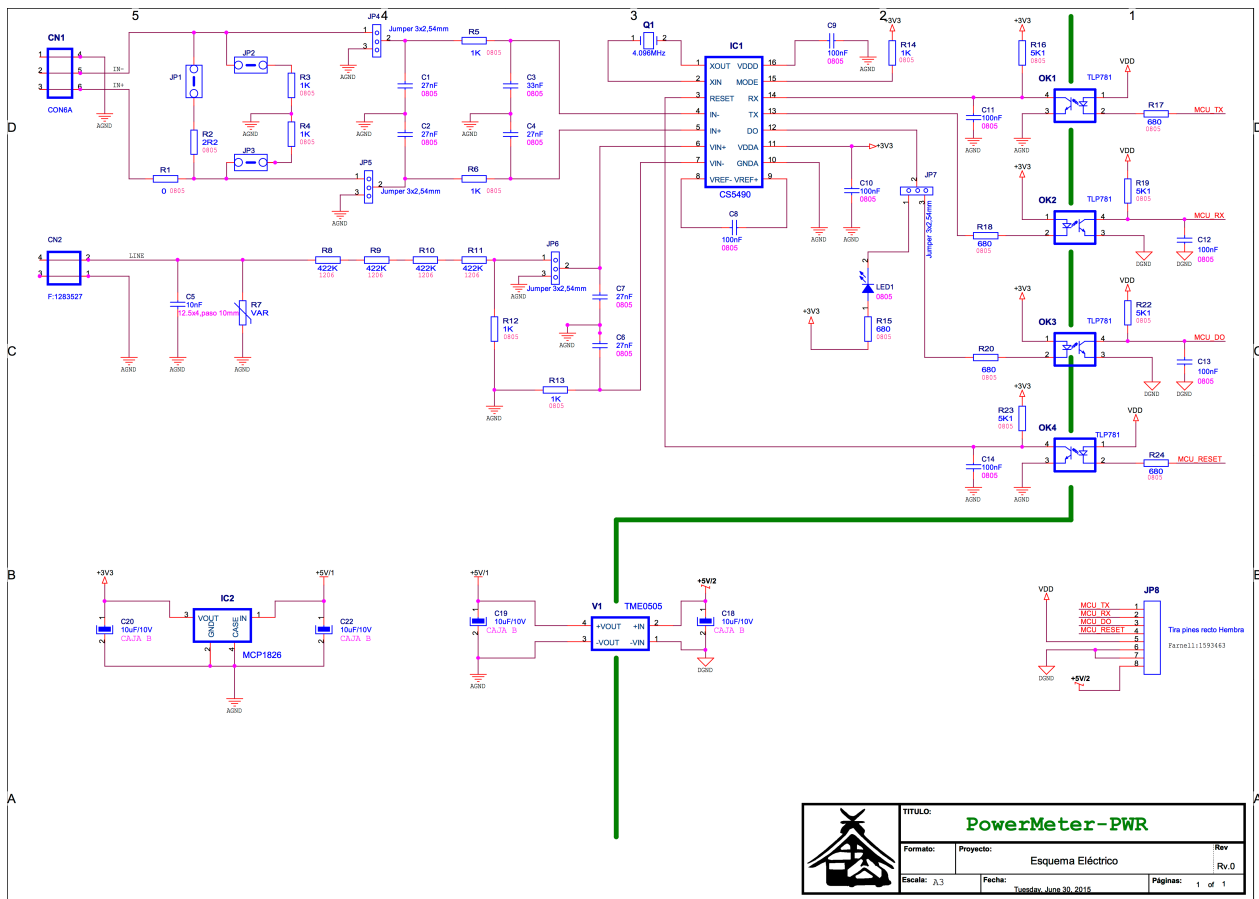
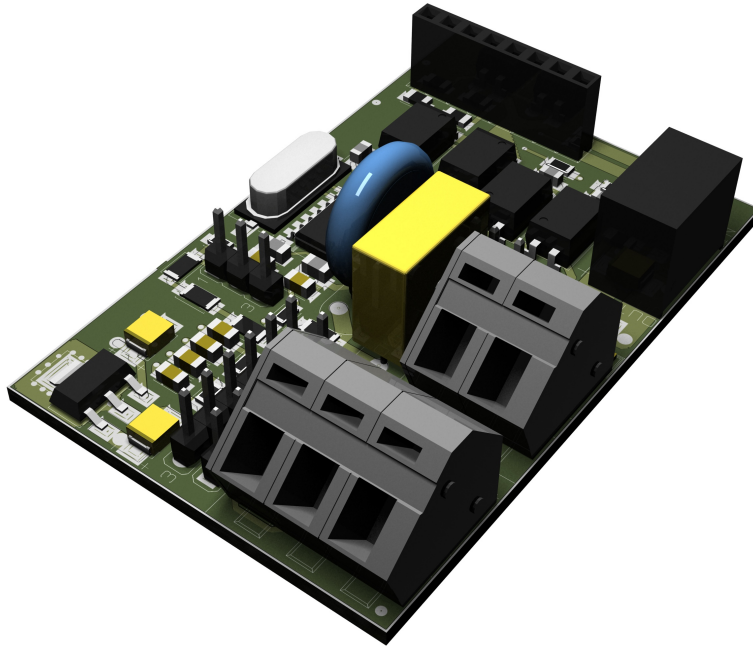


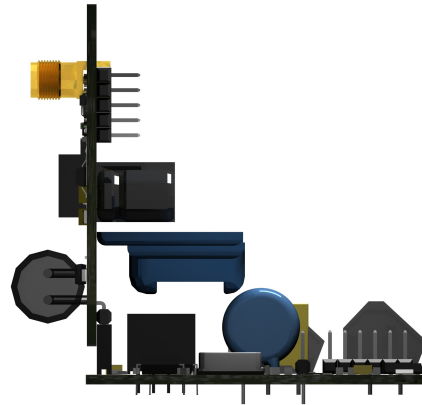
Figura 24. Esquemático de la Sensor Board



*Figura 25. Representación de la Sensor Board Completa*

La Sensor Board está compuesta principalmente por dos sensores – de tensión y corriente – que obtendrán las señales de potencia, y por un circuito integrado – IC, *Integrated Circuit* –, encargado de realizar las medidas de energía al que los sensores pasan las señales leídas. Los sensores no solo captan las señales sino que también, con ayuda de la red de elementos pasivos – condensadores y resistencias – que hacen las funciones de filtro de la señal, las adecuan y reducen a unos niveles correctos para su procesamiento por parte del IC.

En la siguiente Figura podríamos ver como quedan todas las placas conectadas en una vista de perfil.



*Figura 26. Representación de todas las placas juntas. Vista de Perfil.*

A continuación se detallan los estudios realizados para la selección del Circuito Integrado y los Sensores de Tensión y Corriente.

#### 3.3.2.1 Circuito Integrado

Se han analizado diferentes maneras de realizar un medidor de energía, contando principalmente con dos opciones. La primera de ellas consistente en conectar los sensores de potencia directamente a la Main Board, siendo ésta la encargada de realizar la conversión y procesamiento de la señal proporcionada por el sensor directamente, mientras que para la segunda, además del sensor y la Main Board se dispone de un circuito integrado específico de medida, restando carga de trabajo a la Main Board y añadiendo precisión y prestaciones al dispositivo, a costa de un coste y tamaño ligeramente superiores. Este tipo de dispositivos realizan los cálculos de corriente, tensión, potencia y energía oportunos en base a los datos obtenidos por los sensores de corriente y tensión.

Se han estudiado y realizado pruebas de funcionamiento con varios circuitos integrados existentes en el mercado, que cumplen con las exigencias mínimas necesarias para proporcionar la información relevante y ofrecer un adecuado funcionamiento. En la siguiente tabla se indican las principales características de los dispositivos más destacados de entre los que han sido estudiados.

Tabla 6 Comparativa dispositivos medidores de energía

	<b>78M6610+PSU</b>	<b>STPM10</b>	<b>CS5463</b>	<b>CS5490</b>
<b>Fabricante</b>	Maxim Integrated	STMicroelectronics	Cirrus Logic	Cirrus Logic
<b>Medida</b>	Potencia Activa, Aparente y Reactiva	Potencia Activa, Aparente y Reactiva	Potencia Activa, Aparente y Reactiva	Potencia Activa, Aparente y Reactiva
<b>Tensión de entrada – V –</b>	±0.3	±0.3	0.5	±0.3
<b>Interfaz</b>	UART, SPI, I <sup>2</sup> C	SPI	SPI – 3 hilos –	UART
<b>Tipo de sensor</b>	Shunt y transformadores de corriente	Shunt y transformadores de corriente	Shunt y transformadores de corriente	Shunt, transformadores de corriente y Rogowski
<b>Frecuencia – Hz –</b>	45..65	45..65	50..60	50..60
<b>Alimentación – V –</b>	3..3,6	3..5,5	4,75..5,25	3..3,6
<b>Consumo máximo – mW –</b>	34	30	17,5	13
<b>Precio – € –</b>	Uno: 1,64	Uno: 2,46	Uno: 2,03	Uno: 3,06

	Más de 100: 1,55	Más de 100: 1,59	Más de 100: 1,19	Más de 100: 2,24
--	------------------	------------------	------------------	------------------

El circuito integrado seleccionado finalmente ha sido el **CS5490** de Cirrus Logic, principalmente por su bajo consumo y por su óptimo acceso a los registros de lectura y configuración, así como por la posibilidad de usar el sensor de corriente de tipo *Rogowski*. Aunque otros de los dispositivos estudiados también podrían haber sido una opción viable, han sido descartados, bien por falta de existencias en el mercado, por recomendaciones del fabricante de no ser usados para nuevos diseños o por coste.

El chip se complementa con una serie de componentes externos como son un cristal, condensadores de desacoplo y resistencias que hacen que el CS5490 funcione correctamente.

### 3.3.2.2 Sensores de Tensión y Corriente

A la hora de obtener la tensión y la corriente instantáneas que se consumen en los distintos puntos de medida, a partir de las cuales el dispositivo encargado de la medición, comentado en el apartado anterior, realizará el procesamiento para conseguir los parámetros necesarios – tensión y corriente RMS, potencia activa, reactiva y aparente, etc. –, se hace necesario emplear un sensor de corriente y otro de tensión. A continuación se detallan los sensores empleados para cada magnitud y sus características.

#### Sensor de tensión:

Como sensor de tensión se ha empleado un **divisor resistivo**, compuesto por varias resistencias de valores elevados, componiendo una impedancia final de gran magnitud, que reduce el nivel de tensión alterna a unos valores manejables, mucho menores. Las salidas de este divisor resistivo son conectadas a las entradas del IC, pasando por los filtros correspondientes.

#### Sensor de corriente:

Para la corriente, se ha hecho un estudio de los diferentes sensores de corriente disponibles en el mercado, para hacer una elección según sus características. La Tabla 7 muestra una comparativa de los sensores analizados y de su mejor o peor funcionamiento con respecto a diferentes parámetros.



Tabla 7. Comparativa sensores de corriente

	<i>Resistencia Shunt</i>	<i>Transformador corriente</i>	<i>Sensor Efecto Hall</i>	<i>Bobina Rogowski</i>
<i>Linealidad en rango medición</i>	✓✓	✓	✗	✓
<i>Capacidad medición altas corrientes</i>	✗✗	✓	✓	✓✓
<i>Consumo Potencia</i>	✗	✓	-	✓
<i>Problemas saturación corriente DC</i>	-	✗	✗	-
<i>Variación respecto T°</i>	-	✓	✗	✓✓
<i>Problema offset DC</i>	✗	-	✗	-
<i>Problema saturación e histéresis</i>	-	✗	✗	-
<i>Sensibilidad</i>	✓	✓	✓	✗
<i>Rango Medida</i>	-	✓	✗	✓
<i>Coste</i>	✓✓	✗✗	-	✓
<p>‘✓✓’ indica comportamiento excelente con respecto al parámetro medido</p> <p>‘✓’ indica comportamiento superior con respecto al parámetro medido</p> <p>‘-’ indica el valor medio</p> <p>‘✗’ indica comportamiento inferior o que presenta algún problema</p> <p>‘✗✗’ indica no es válido de ninguna manera</p>				

Atendiendo a las características de estos sensores, aquel que mejores prestaciones presenta es la bobina de *Rogowski*, pero tiene una muy baja sensibilidad, por lo que no es útil para corriente poco elevadas. Este sensor sería conveniente para uso industrial debido a su estabilidad y al gran rango de corrientes que es capaz de medir – del orden de mil amperios –. Sin embargo, la corriente máxima de los dispositivos admitidos para la conexión y desconexión en carga para instalaciones interiores de baja tensión es de 16 Arms según la norma UNE-HD 60364-5-54 y la guía de aplicación ITC-BT-19. Por esta razón, para aplicaciones domésticas – ámbito de actuación del proyecto – es más conveniente el uso de otro tipo de sensores.

Por otro lado, los sensores de *Efecto Hall* se han descartado también por su baja linealidad y la elevada variación con respecto a la temperatura.

Por consiguiente, se ha optado por usar la **resistencia *shunt*** y/o el **transformador de corriente** como sensor. La resistencia *shunt* es una resistencia común pero con un valor óhmico muy reducido, del orden de mili o micro ohmios, por lo que según apunta la ley de ohm, la diferencia de potencial en sus terminales es muy baja para corrientes de valor elevado, como las que consumen los dispositivos medidos. El transformador de corriente consiste en una serie de elementos pasivos que convierten corrientes elevadas en corrientes de iguales características pero de valor mucho menor, se apoya en una red de resistencias externas para convertir la corriente de salida a un nivel de tensión medible por el chip.

El uso de una u otra opción dependerá de la máxima corriente que el dispositivo necesite medir, ya que el coste del transformador de corriente es bastante superior y la linealidad de la resistencia *shunt* es altamente mejor. En la siguiente Figura se pueden observar los sensores empleados.



*Figura 27. Sensor de Corriente: transformador de corriente*



*Figura 28. Sensores de corriente: resistencia shunt*

### 3.3.3 ACTOR BOARD

El módulo Actor Board es el encargado de la activación/desactivación de cada unidad de consumo que se desea monitorizar, a través del corte o reanudación de su alimentación, para ello se hace uso de un relé y de un pequeño circuito de acondicionamiento de su señal de control. Existen en el mercado relés de estado sólido y relés electromecánicos, para el proyecto se han empleado relés de estado sólido, debido a que proporcionan ciertas ventajas para su uso con las corrientes máximas que manejan, con respecto a los relés electromecánicos, entre las que se pueden destacar:

- Inexistencia de las partes mecánicas y de su consecuente desgaste por el uso continuado
- Conexión y desconexión de la carga solo cuando la tensión pasa por cero
- Ausencia de perturbaciones eléctricas en la conmutación
- Amplio margen de la tensión de control
- Aislamiento galvánico elevado entre circuito de control y carga
- Elevada resistencia mecánica
- Ausencia de ruido en la conmutación

Para la elección de un modelo concreto de relé de estado sólido se han comparado sobre todo la corriente máxima que pueden soportar, el tamaño del dispositivo y el precio del mismo, puesto que se trataba de realizar un producto comercial para el hogar y que fuera lo más integrable posible. En la siguiente tabla se pueden apreciar algunos de estos parámetros, entre otros.

*Tabla 8. Comparativa relés de estado sólido*

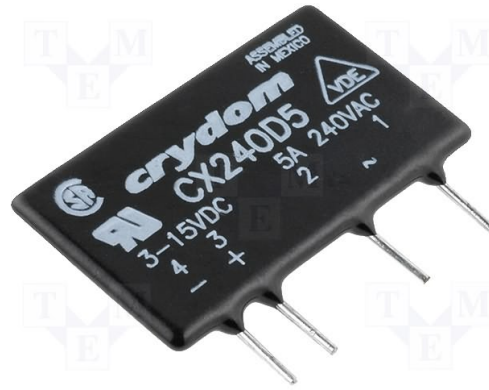
	<b><i>CX240D5/10</i></b>	<b><i>D24110</i></b>	<b><i>SPF240D25</i></b>
<b>Tipo relé</b>	Estado sólido		
<b>Tipo control</b>	DC		
<b>Tensión control – V –</b>	3-15	3-32	3-15
<b>Tensión operación –</b>	12-280	24-280	12-280

<b>Vrms –</b>			
<b>Corriente máxima –</b>	5/10	110	25
<b>Arms –</b>			
<b>Frecuencia – Hz –</b>	47-63	47-440	47-63
<b>Tiempo activación</b>	½ ciclo	½ ciclo	½ ciclo
<b>Coste – € –</b>	11,45	64,53	20,92
<b>Coste/Corriente – €/A –</b>	2,29	0,586	0,837

Tras la comparativa, se han seleccionado dos modelos de relés, el **CL240D10** y el **CS240D5**, ambos de la casa CRYDOM. El primero de ellos soporta hasta 10A con un tamaño bastante mayor al segundo, que es muy apto para la integración pero solo soporta 5A de corriente, ambos valores de corriente son aptos para aplicaciones domóticas. Por otro lado, su precio unitario es mucho menor que el de los otros modelos de estudio, lo cual fue decisivo en la elección. Ambos modelos se tienen en cuenta para el desarrollo, dependiendo de las necesidades de cada caso. En la siguiente Figura se puede observar imágenes de ambos.



Figura 29. Relés de estado sólido: CL240D10



*Figura 30. Relés de estado sólido: CS240D5*

### 3.4 CONCLUSIONES

Cada uno de los componentes Hardware se ha estudiado y comparado con varias alternativas, en general se han tenido en cuenta unos límites estrictos en las especificaciones técnicas y dentro de los mismos se ha optado por los sistemas que tuvieran un mejor equilibrio entre sus características y su precio. Entre los principales requisitos técnicos se encuentran los de comunicaciones y seguridad, ya que el entorno donde se implanta el sistema es doméstico y por lo tanto debe de cumplir con los estándares adecuados para no interferir con el resto de elementos de una vivienda común.

El conjunto formado por la Unidad Central ha quedado compuesto por:

- VICTRON Multiplus Compact 12|2000|8, como Unidad de Control de Energía
- 2 x UP-SP250, como Sistema de Almacenamiento Energético
- Raspberry Pi B+, como Unidad de Gestión de Datos
- uLCD32PTU, como Interfaz Física

Por otro lado, cada elemento de la red de Power Meter Actuator's se conforma con los siguientes componentes principales:

- System-on-chip CC2538, en la Main Board como procesador y radio.
- Divisor resistivo y resistencia shunt, en el Sensor Board.
- CL240D10 y el CS240D5, en el Actor Board.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE CONTROL

A continuación se explican los distintos módulos software necesarios para la ejecución y comunicación entre los distintos elementos del sistema. Igualmente se describe donde se ejecutan cada uno de ellos y que relación tienen entre ellos.

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Por una parte, se tiene la **Unidad Central** con la **Unidad Gestión de Datos** que se encarga de: controlar, configurar y leer los datos del **Unidad de Control de Energía** – Inversor-Cargador VICTRON –, recibir los datos de consumo y enviar las acciones de conexión/desconexión a través de una **Main Board**, parte del PMA pero sin la Sensor y Actor Boards, mostrar la información relevante a través de la **Pantalla Táctil** y sincronizar todos los datos del sistema con la **nube**, permitiendo que éstos sean accesibles mediante la interfaz de usuario a través de plataformas móviles.

Por otro, se tienen los **Power Meter Actuators** – **PMAs** –, que forman la Red de Sensores Inalambricos. Cada PMA está formado por una **Main Board** que se comunica con una **Sensor Board** – CS5490 – mediante el puerto UART para recibir los datos de consumo, y con una **Actor Board** – relés – mediante el GPIO para enviarle los mensajes de conexión/desconexión de los dispositivos eléctricos.

Las comunicaciones del sistema se pueden apreciar en la siguiente Figura.

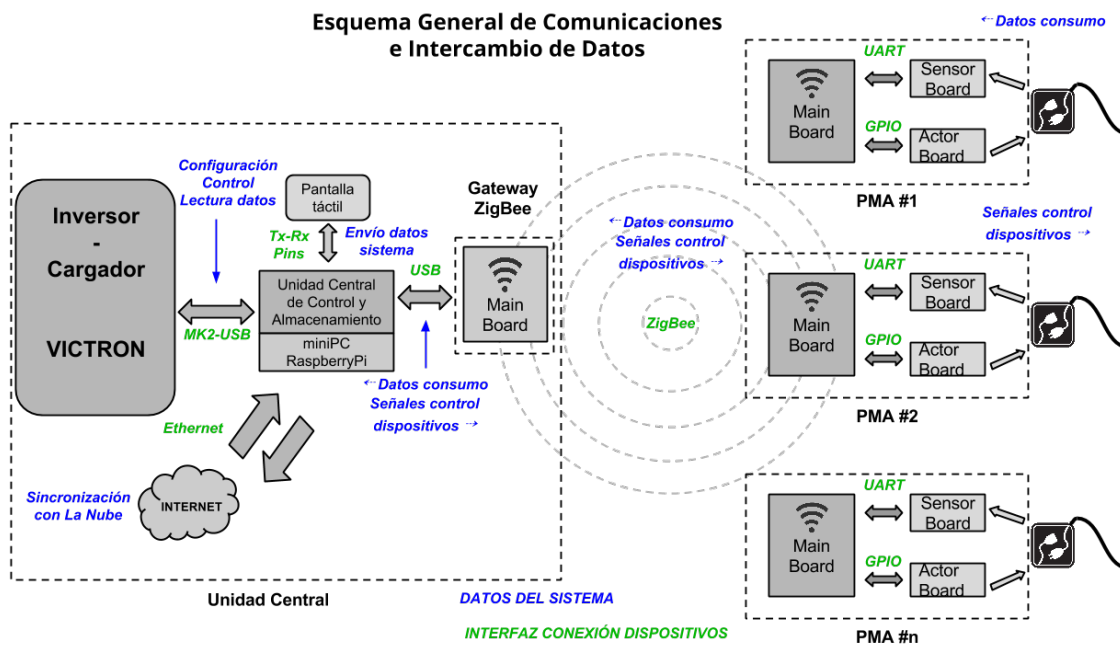


Figura 31. Esquema general de comunicaciones



Para elegir y desarrollar el software que acompaña al sistema, las comunicaciones entre los diferentes nodos tienen un papel fundamental, ya que existen importantes puntos a cumplir para que el sistema satisfaga las expectativas. Lo más importante es que dote al sistema de una infraestructura sencilla de configurar – adición/supresión de nodos –, que permita el alojamiento de los datos en la nube para su acceso desde el exterior, que el consumo sea consecuente con el propósito del proyecto y que el tiempo de desarrollo no sea elevado.

A continuación se detallan por separado los componentes software de la Unidad Central y del PMA.

## 4.2 SOFTWARE DE LA UNIDAD DE CONTROL

### 4.2.1 UNIDAD GESTIÓN DE DATOS

La Unidad de Gestión de Datos, opera sobre el miniPC *Raspberry Pi* equipado con un SO variación de Linux. Bajo este SO y en lenguaje *python* se ha desarrollado una aplicación de control y configuración del inversor, que usa el protocolo de comunicaciones propietario del inversor – proporcionado por el fabricante –. Usando dicha aplicación se accede a toda la información aportada por el inversor, siendo entre otras, el estado de carga de las baterías, el modo de funcionamiento del inversor – solo red eléctrica externa, solo baterías, red eléctrica externa más baterías, carga de baterías, etc. –, el consumo que se está haciendo de las baterías y de la red externa, el estado de la onda senoidal de corriente alterna que le entra al hogar y otros parámetros de gran utilidad para realizar un análisis exhaustivo del funcionamiento del sistema. Por otro lado, la nombrada aplicación da también la opción de configurar todos y cada uno de los parámetros – modificables – del inversor, pudiendo así adaptar el sistema a una configuración con baterías de distintas capacidades, o con una red eléctrica cuyo valor de potencia contratada sea diferente del establecido por defecto.

La información adquirida de la red de PMAs y de la Unidad de Gestión de Energía se procesa y almacena en la BBDD que lleva implementada, para luego poder ser mostrados por la pantalla o accedidos desde la nube.

Toda la información recogida se almacena en una BBDD instalada en el motor de bases de datos *SQLite*. Se trata de un sistema de gestión de bases de datos relacional, contenida en una relativamente pequeña – ~275 kiB – biblioteca escrita en C. A diferencia de los sistemas de gestión de bases de datos cliente-servidor, el motor de *SQLite* no es un proceso independiente con el que el programa principal se comunica. En lugar de eso, la biblioteca *SQLite* se enlaza con el programa pasando a ser parte integral del mismo, esto reduce la latencia en el acceso a la base de datos. Por estas características, es uno de los sistemas más comunes en dispositivos con no muy elevada capacidad de procesamiento, como es este caso. Toda la información se almacena localmente en una unidad SD flash.

Como se ha comentado, la unidad central también cuenta con una api de control de la pequeña pantalla táctil LCD, permitiendo así interactuar con el usuario para mostrarle los datos más relevantes del sistema y que este pueda elegir qué datos ver y de qué manera en cada momento.

La Unidad Central podrá trabajar según los siguientes cuatro modos de funcionamiento:

- **Modo normal en carga.** La fuente de energía de la instalación eléctrica es la toma de corriente externa de la vivienda u oficina, y el inversor/cargador se encarga de dejar pasar la corriente directamente y a la vez realizar la carga de las baterías.
- **Modo normal.** Si las baterías están cargadas y no existe ninguna otra incidencia, se conecta directamente la instalación con la toma externa.
- **Modo baterías.** En el caso de una caída del suministro de la red eléctrica el inversor/cargador se encarga de conmutar y utilizar las baterías como fuente de energía.
- **Modo potencia.** También puede ocurrir que se requiera un mayor nivel de potencia, en este caso el inversor/cargador realiza el suministro de energía empleando tanto la red eléctrica externa como las baterías.

La potencia de la instalación eléctrica puede ser mayor a la contratada gracias al sistema de baterías, por lo que tras el inversor/cargador se instalará otro ICP. Este ICP desconectará la instalación cuando los aparatos conectados requieran un nivel de potencia superior a la suma del suministrado por la compañía eléctrica y del nivel máximo de potencia que puede suministrar el inversor/cargador.

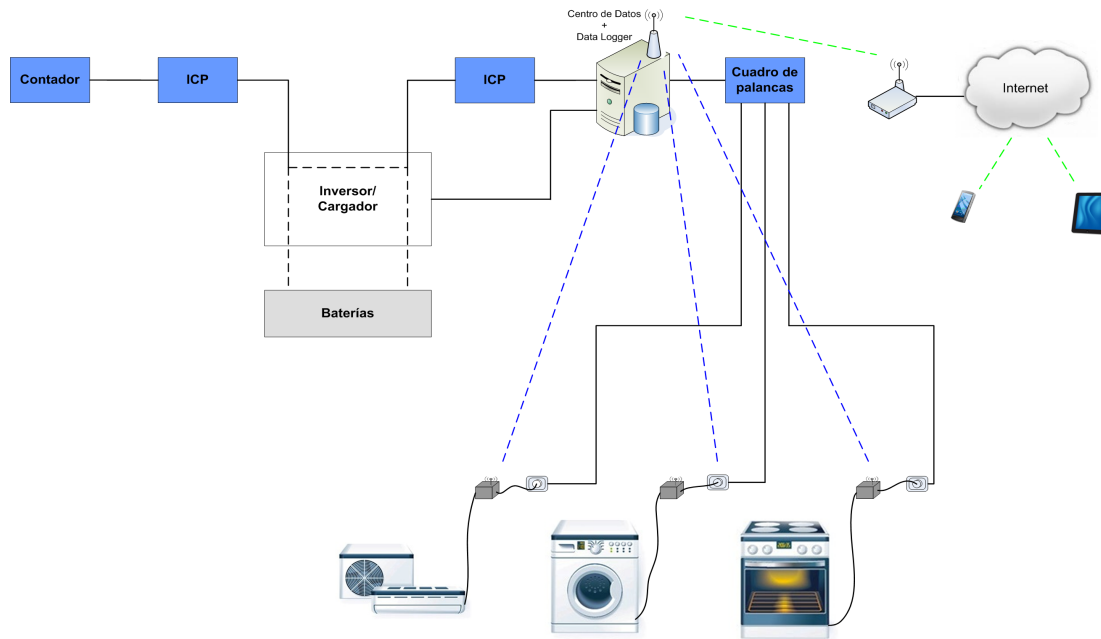


Figura 32. Esquema del Sistema

Modo de operación de la Unidad Central:

```

While load > threshold:
    While battery voltage > minimum:
        Activate Inverter;
    If battery voltage < critical load:
        Shutdown Devices;
else:
    While battery voltage < maximum:
        Activate Charger;
While supply outage:
    While battery voltage > minimum:
        Activate Inverter;
    
```

Donde *threshold* es el máximo contratado a la empresa eléctrica, *minimum* es el punto de mínimo de voltaje de batería para su correcto funcionamiento, *critical load* es el voltaje establecido en la batería como tope inferior de alerta y *maximum* es el voltaje de la batería totalmente cargada.

Adicionalmente la red de *PowerMeters-Actuators –PMA-* provee de información a la unidad central y recibe el consumo total de forma que en cada uno de ellos se realiza una gestión del punto de corriente a pudiendo impedir que se active en el caso de que la demanda esperada – el máximo que se ha solicitado históricamente – supere a la demanda total permitida por el sistema:

$$\text{PotenciaTotal} < \text{PotenciaEsperada-PMA} + \text{PotenciaDemandaActual}$$

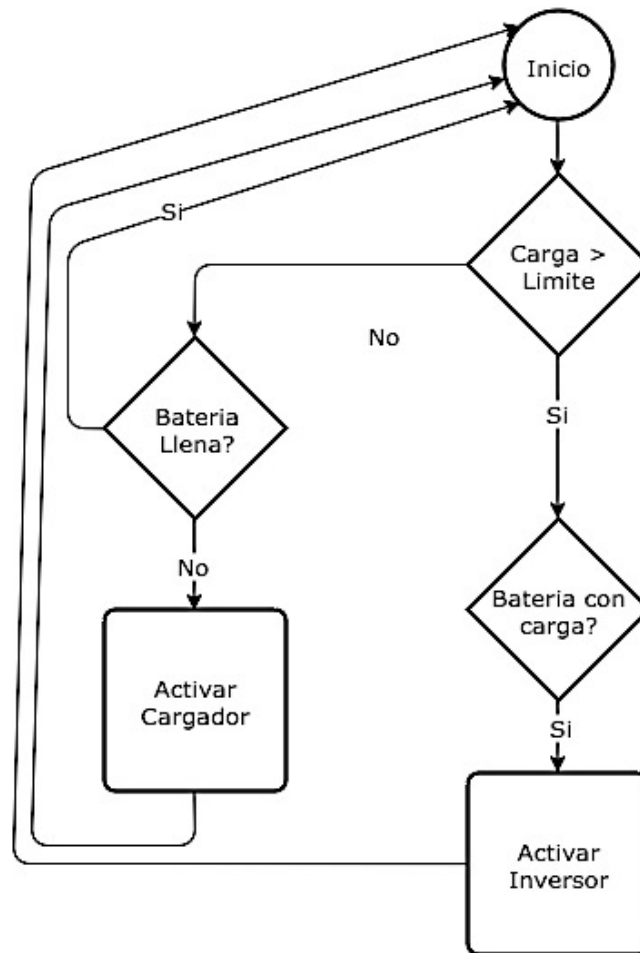
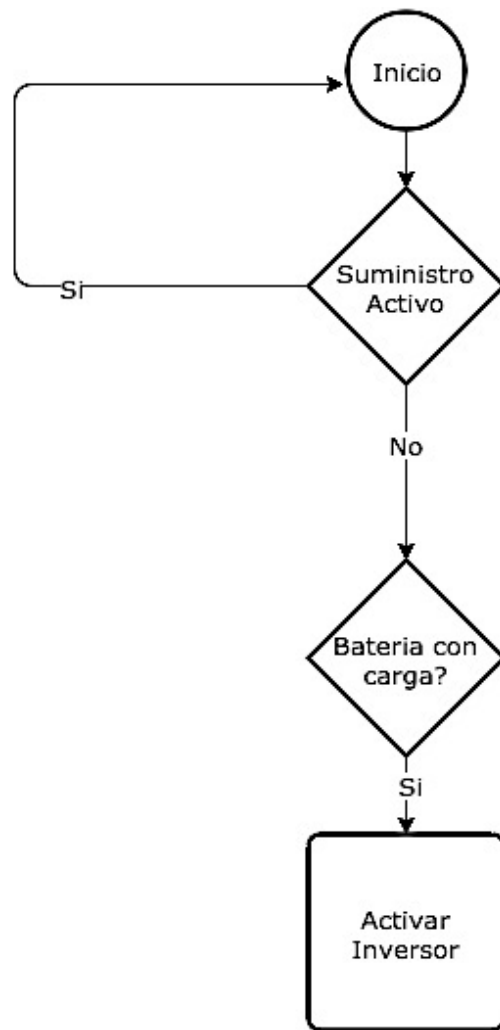


Figura 33. Diagrama de Flujo de Gestión de Potencia



*Figura 34. Diagrama de Flujo de Gestión en Corte de Suministro*

#### 4.2.1.1 API de la Unidad de Control de Potencia

El API de la Unidad de Control de potencia implementa la interfaz MK2. La interfaz MK2 provisiona una conexión serie galvánicamente aislada con una velocidad de transmisión 2400 sin paridad, 8 bits de datos y 1 bit de stop. El formato básico de un mensaje es:

<Length> 0xFF <Command> <Data0> ... <DataN-1> <Checksum>

- <Length> es el número de bytes en el mensaje, excluyendo los bytes de <Length> y <Checksum>. Si el bit más significativo de <Length> es 1, el mensaje incluye el estado del LED.
- <Command> indica el propósito del mensaje.
- <Data...> son los bytes de datos y su número depende del comando anterior.

- <Checksum> se calcula como la suma de todos los bytes en el mensaje – incluyendo <Lenght> y <Checksum> – igual a 0.

El comando básico de trabajo es el comando W. Este comando puede generar respuestas con multiples paquetes W de 3 bytes incluidos en un mensaje MK2. Los comandos W básicos con:

W command	Name
0x05	CommandSendSoftwareVersionPart0
0x06	CommandSendSoftwareVersionPart1
0x0E	CommandGetSetDeviceState
0x30	CommandReadRAMVar
0x31	CommandReadSetting
0x32	CommandWriteRAMVar
0x33	CommandWriteSetting
0x34	CommandWriteData
0x35	CommandGetSettingInfo
0x36	CommandGetRAMVarInfo

*Figura 35. Comandos W de MK2*

Toda esta funcionalidad se ha cubierto con un API en Python para facilitar su uso desde la Unidad de Gestión de Datos. Los parámetros básicos que se han implementado son:

- ConfigurarPotenciaMáxima
- ObtenerPotenciaBateria
- ObtenerPotenciaProveedor
- ObtenerPotenciaDemandada
- ObtenerEstadoBateria

De esta forma se puede operar con la información provista por al Unidad de Control de Potencia de forma continua y almacenar los datos necesarios tanto de forma local como en remoto.

#### 4.2.1.2 Almacenamiento Local de Datos

Los datos se almacenan localmente en una base de datos Sqlite (Hipp and Kennedy, 2007) versión 3. Para el completo almacenamiento de los datos se han creado el siguiente esquema:

```
CREATE TABLE StatusNameVictron
```

```
(
```

NameID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

NameStatus VARCHAR(25)

);

CREATE TABLE FrameConfiguration

(

FrameID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

FrameTime DATETIME,

FrameConfiguration VARCHAR(200)

);

CREATE TABLE StatusVictron

(

StatusID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

StatusTime DATETIME,

StatusVictron INTEGER,

FOREIGN KEY (StatusVictron) REFERENCES StatusNameVictron(NameID)

);

CREATE TABLE Master\_Multiled

(

MultiledID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,



```

MultiledTime DATETIME,

ACInputConf INTEGER,

MinInCurrentLimit DECIMAL(6,2),

ActInCurrentLimit DECIMAL(6,2),

MaxInCurrentLimit DECIMAL(6,2)

);

CREATE TABLE StatusLed

(

StausLedID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

StatusLedTime DATETIME,

MainsLed INTEGER,

AbsorptionLed INTEGER,

FloatLed INTEGER,

BulkLed INTEGER,

InverterLed INTEGER,

OverloadLed INTEGER,

LowBatteryLed INTEGER,

TemperatureLed INTEGER

);

```

CREATE TABLE DataMeasure

(

DataID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

DataTime DATETIME,

Phase INTEGER,

DCVoltage DECIMAL(6,2),

DCCurrentCharging DECIMAL(6,2),

DCCurrentInverter DECIMAL(6,2),

MainsVoltage DECIMAL(6,2),

InverterVoltage DECIMAL(6,2),

MainsCurrent DECIMAL(6,2),

InverterCurrent DECIMAL(6,2),

MainsPeriod DECIMAL(6,2),

InverterPeriod DECIMAL(6,2),

InstEnergyAC DECIMAL(10,2),

InstEnergyHome DECIMAL(10,2),

InstEnergyBattIn DECIMAL(10,2),

InstEnergyBattOut DECIMAL(10,2),

batt DECIMAL(6,2)

);

CREATE TABLE EnergyHour

(

EnergyHourID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

EnergyHourTime DATETIME,

EnergyHourAC DECIMAL(10,2),

EnergyHourHome DECIMAL(10,2),

EnergyHourBattIn DECIMAL(10,2),

EnergyHourBattOut DECIMAL(10,2)

);

CREATE TABLE EnergyDay

(

EnergyDayID INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,

EnergyDayTime DATETIME,

EnergyDayAC DECIMAL(10,2),

EnergyDayHome DECIMAL(10,2),

EnergyDayBattIn DECIMAL(10,2),

EnergyDayBattOut DECIMAL(10,2)

);

Esta base de datos se gestiona directamente desde Python a través de la librería *sqlite3* implementada en C y en base al standard DB-API 2.0 (“PEP 0249 -- Python Database API Specification v2.0,” n.d.).

#### 4.2.2 COMUNICACIÓN CON LA NUBE

La Unidad Central cuenta con acceso a la red de internet, lo cual le permite subir la información a la nube, desde donde, a través de las diferentes aplicaciones web, es accesible al usuario con los permisos adecuados, quién puede consultar la información sobre su sistema desde un smartphone o tablet.

Los datos del sistema son subidos a la nube mediante un canal seguro *HTTPS* utilizando el formato de intercambio de datos *JSON*. Para ello, la Unidad Central se autentifica en un Servidor de Aplicaciones usando sus credenciales propias. El Servidor de Aplicaciones funciona mediante *hilo de elementos no bloqueantes* y en él se aloja la información, dentro de la base de datos.

Con la información contenida ya en la nube, se realizan las consultas desde los exploradores web o las aplicaciones móviles. Para ello se utiliza el protocolo abierto OAuth 2.0 – *Open Authorization*, (D. Hardt, 2013)–, que permite autorización segura de una API de modo estándar y simple para aplicaciones de escritorio, móviles y web.

Los datos se almacenan en *Google Cloud Datastore* a través del API que Google provisiona para el lenguaje Python.

##### 4.2.2.1 Google Cloud Datastore

Es una base de datos de documentos de tipo NoSQL, es decir, no establece controles ni reglas de tipo entidad-relación como las tradicionales bases de datos SQL. Se ha construido para ser altamente escalable, con un alto rendimiento y facilitar su uso. Usa un modelo entidades – documentos – y relacionados entre las mismas tipo padre-hijo o ancestro-entidad. Las principales características del sistema son:

- **Transacciones atómicas.** Puede ejecutar un conjunto de operaciones de forma que o todas tienen éxito o ninguna de ellas se lleva realmente a cabo.

- **Alta disponibilidad de escrituras y lecturas.** El sistema está operado por los centros de datos de Google, que utilizan redundancia para minimizar el impacto de posibles puntos de fallo.
- **Altamente escalable con alto rendimiento.** Su arquitectura distribuida gestiona automáticamente el escalado. Usa una mezcla de restricciones sobre índices y consultas para escalarlas sobre el tamaño del resultado no sobre el rango de datos sobre el que se consulta.
- **Encriptación transparente.** El sistema automáticamente encripta todos los datos antes de escribirlos en disco y automáticamente los desencripta en las lecturas por un usuario autorizado. Utiliza el protocolo *Advanced Encryption Standard – AES (FIPS PUB 197, 2001)*– de 256 bits.

#### 4.2.3 INTERFAZ DE USUARIO DE LA UNIDAD CENTRAL

La Interfaz de Usuario, formada por una pantalla táctil, se programa con un IDE preparado para general la codificación del procesador PICASO. El sistema es propietario de 4D Labs y su base es una motor software virtual denominada EVE – Extensible Virtual Engine –. El diagrama de bloques interno de este motor se puede ver en la siguiente figura:

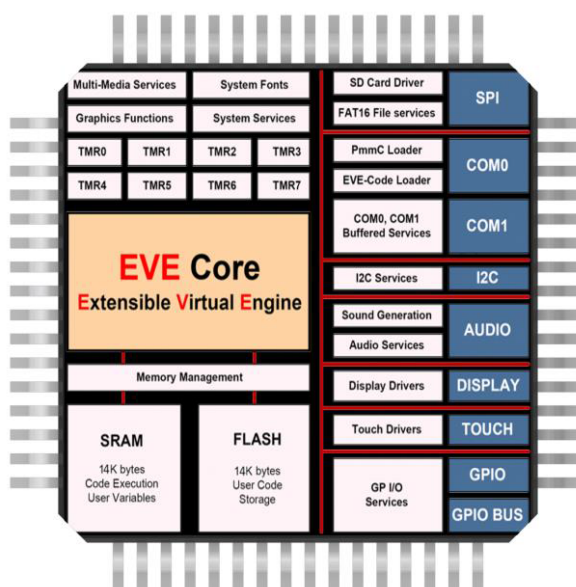


Figura 36. Diagrama de Bloques Interno de PICASO

El dispositivo viene con un IDE propietario – Workshop4 – pero gratuito que facilita la configuración y programación de las distintas interfaces generando el código fuente de forma bastante

sencilla e intuitiva. El código generado se aloja en la Unidad de Gestión de Datos y se comunica con el dispositivo a través de un puerto serie.

#### 4.2.4 COMUNICACIÓN CON LA RED DE PMAS

La comunicación con la *Personal Area Network* – *PAN* – formada por los PMAs se realiza a través de un Main Board conectado a la Unidad de Gestión de Datos. Este Main Board tiene el código de comunicaciones que se describirá en la siguiente sección y un modulo extra que permite el reenvío de estos datos a través del puerto USB con el que se conecta a la Unidad de Gestión de Datos.

### 4.3 CONSIDERACIONES SOBRE SEGURIDAD DE LAS COMUNICACIONES

Se han tenido en cuenta los aspectos de seguridad en las comunicaciones inalámbricas locales y en la comunicación con la nube. A continuación se describen las consideraciones incluidas en este trabajo.

#### 4.3.1 SEGURIDAD EN RED PERSONAL AREA NETWORK – PAN –

Las comunicaciones entre la Unidad Central y las diferentes Motas Operadoras se realizan, como ya se ha comentado, de manera inalámbrica mediante *ZigBee*. Esto puede suponer un riesgo en el caso de que una persona ajena al sistema, con intenciones maliciosas, intercepte los mensajes intercambiados, ya sea para obtener la información del sistema o para suplantar los mensajes, enviando datos o mensajes de acción falsos.

Es por esta razón, que se ha decidido implementar un sistema de seguridad que aporte un grado de fiabilidad alto, a la par que no suponga una excesiva carga computacional a los componentes del sistema. Se ha decidido, por tanto, usar un sistema de encriptación mediante cifrado asimétrico, que usa claves públicas y claves privadas – una para cifrar y otra para descifrar –.

Funciona de tal manera que los mensajes enviados son cifrados mediante clave pública – conocida por “cualquiera” – y descifrados mediante la clave privada, que únicamente conoce su propietario. De este modo, cualquiera podría cifrar un mensaje y enviarlo a su receptor, pero solamente el receptor podrá descifrar y leer el mensaje. Este sistema permite reducir notablemente el número de claves que debe almacenar cada integrante de la comunicación – tan solo su clave privada y las claves públicas de cada elemento existente en el sistema –.

El sistema tiene el problema de que, a pesar de no poder leer los mensajes intercambiados en el sistema, un atacante podría suplantar a uno de los elementos del sistema y enviar mensajes en su nombre, suponiendo un fallo en el sistema. Es por ello que, previo al envío de mensajes, se realiza una autenticación del remitente para que el destinatario esté seguro de que quien envía el mensaje es el dispositivo correcto.

Para realizar la autenticación, se realiza una *firma digital*, consistente en que el mensaje se firma con la clave privada del remitente y se descifra por parte del destinatario – o cualquiera que la posea – con

la clave pública del primero. Esto demuestra que el remitente tenía acceso a la clase privada, por lo que muy probablemente sea el remitente correcto.

Una vez autenticado el remitente – y asegurado el destinatario de que los mensajes vienen de una fuente fiable –, se aceptan los mensajes recibidos, que vendrán cifrados con la clave pública del destinatario y solo éste podrá descifrar, asegurando así la seguridad de las comunicaciones.

El sistema se configura de tal manera que cada dispositivo conozca las claves necesarias para la encriptación. Si se añade un nuevo elemento al sistema, este deberá identificarse y enviar y recibir las claves necesarias para la transmisión.

#### 4.3.2 SEGURIDAD EN COMUNICACIÓN CON LA NUBE

Como se ha comentado en la sección de comunicación con la nube toda la comunicación se realiza mediante un canal seguro *https*, que es el protocolo de seguridad en la capa de transporte de *http* sobre *Transport Layer Security – TLS*, (S. Turner and T. Polk, 2011) –. Adicionalmente el sistema de autorización de acceso a datos en la nube se realiza mediante *OAuth2.0*. Su principio de funcionamiento se basa en permitir a un cliente acceder a contenidos propiedad de un usuario – alojados en una aplicación de confianza, *servidor de recursos* – sin que éste tenga que manejar ni conocer las credenciales del usuario. En este caso, el usuario es el hogar – Unidad Central –, propietario de los datos contenidos en la red, y el cliente es cualquiera que tenga autorización para ver los datos – los integrantes de la familia del hogar, por ejemplo –.



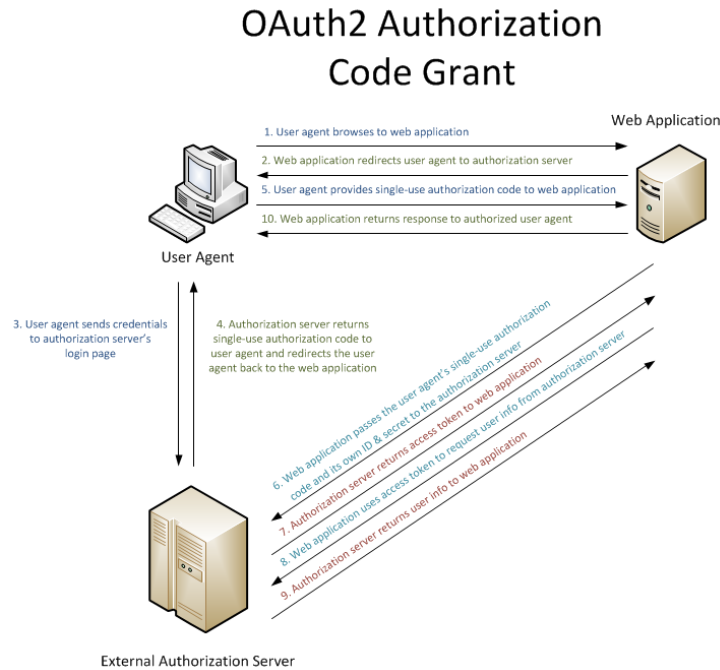


Figura 37. OAuth2: Concesión de Código de Autorización

Para asegurar la confidencialidad del acceso a la información por parte de los clientes autorizados, se realiza un proceso de autenticación previo a la descarga de los datos. Este proceso se resume en el cumplimiento de los siguientes pasos:

El cliente solicita autorización al servidor de autorización informando de sus credenciales y del tipo de concesión solicitada.

El servidor confirma las credenciales del cliente y comprueba tiene los permisos necesarios. En caso afirmativo, concede la autorización para acceder al recurso, informando al cliente del tipo autorización concedida – depende del tipo de concesión solicitada en el primer paso – y devolviendo un *token* de acceso.

Con el *token* de acceso en su poder, el cliente lo envía al servidor de recursos y comienza el intercambio de información.

Tras un *timeout* – periodo de expiración – definido, el *token* de acceso caduca y el proveedor lo rechaza. En este momento debe iniciarse nuevamente el proceso de autenticación para obtener un nuevo *token*.

## 4.4 SOFTWARE DEL POWER METER ACTUATOR

Cada nodo de la red estará conectado a sensores y/o actuadores que permitirán conocer el nivel de corriente que circule por el cable monitorizado o realizar cortes de suministro de cada uno de los electrodomésticos cuando se exceda el consumo y se decida desconectar ese aparato. Se emplearán nodos sensores de bajo consumo que realicen la recogida de datos en tiempo real para poder ofrecer al usuario en cada instante el estado de la instalación eléctrica y entre las distintas tecnologías de comunicación se valorarán especialmente las comunicaciones inalámbricas debido a su flexibilidad y facilidad para el despliegue.

Los nodos sensores de la red deberán enviar paquetes en los que se indiquen los valores de las medidas realizadas por los sensores. Estos paquetes deberán incluir el identificador de la red y del nodo. También dispondrán de otros campos dedicados al envío de la longitud del mensaje, el tipo del mensaje y el valor medido por el sensor.

Cada nodo sensor deberá ser capaz de interpretar los mensajes recibidos y procedentes del Centro de Datos. Estos paquetes estarán formados por los mismos campos que los mensajes enviados por el nodo, pero los campos identificativos de red y nodo corresponderán en este caso al terminal o terminales destino del mensaje, y en el campo datos se incluirán las órdenes enviadas por el Centro de Datos a los nodos sensores. Estas órdenes pueden emitirse para modificar la configuración de los nodos, por ejemplo, para cambiar la frecuencia de muestreo se codificará en el campo de datos el nuevo intervalo temporal en el que se desea que se tomen muestras de los sensores, o para forzar acciones como puede ser el apagado de un electrodoméstico mediante un actuador.

### 4.4.1 SOFTWARE DE LA MAIN BOARD

Los Power Meter Actuator's se han programado usando el Sistema Operativo **Contiki** (Dunkels et al., 2004). Para la programación de los nodos se empleará el lenguaje C, empleando el entorno de desarrollo Instant Contiki. C es un lenguaje débilmente tipificado de nivel medio pero con muchas características de bajo nivel. Además, los compiladores de dicho lenguaje ofrecen extensiones que posibilitan mezclar código ensamblador con código C o acceder directamente a memoria o dispositivos periféricos.

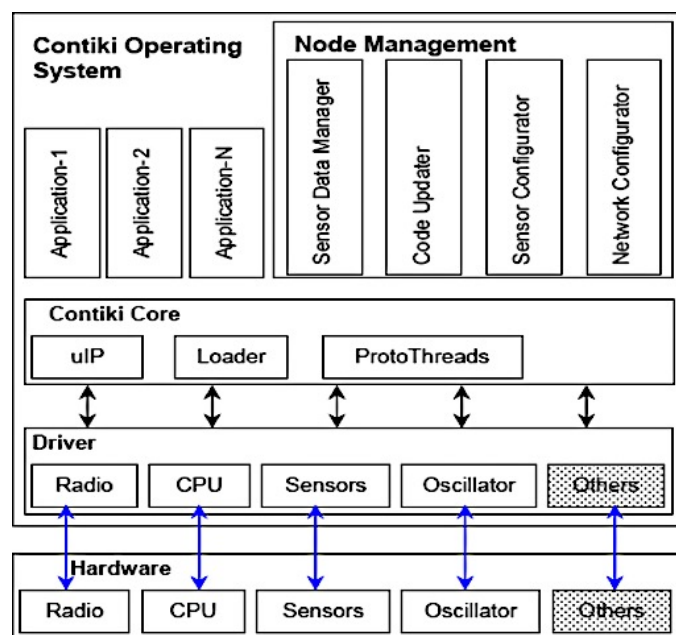


Figura 38. Esquema de componentes de Coniki OS

Por otro lado, la elección de Contiki como sistema operativo se debe a que es un sistema operativo de código abierto distribuido bajo licencia BSD – *Berkeley Software Distribution* –, altamente portable y multitarea desarrollado para ser utilizado en pequeños sistemas, desde ordenadores de 8 bits a sistemas integrados sobre microcontroladores, incluyendo nodos de redes de sensores. Consiste en un núcleo orientado a eventos y sólo se requieren varios kilobytes de código y unos cientos de bytes de RAM. Un sistema completo, con su correspondiente interfaz gráfica de usuario, requiere aproximadamente de 30 KBytes. Estas características se deben a que ha sido diseñado para sistemas embebidos con poca cantidad de memoria.

En el caso de disponer de un nodo que actúe como Gateway, la programación del Gateway se realizará empleando la misma tecnología y estándares que para los nodos sensores. No obstante, se debe tener en cuenta que el Gateway no realiza ninguna función de empaquetado o desempaquetado de los datos.

Este SO está diseñado para sistemas embebidos con escasa memoria, una configuración típica de Contiki consta de 2 KB de RAM y 40 KB de ROM. Está escrito en el lenguaje de programación C y usa una licencia tipo BSD. Cuenta con un núcleo orientado a eventos sobre el cual los programas pueden ser cargados y descargados de forma dinámica en tiempo de ejecución. Los procesos en Contiki usan proto-hilos – *ProtoThreads* –, un mecanismo de abstracción ideado para proporcionar un estilo de programación secuencial sobre el núcleo orientado a eventos. También soporta multi-hilado

apropiado opcional por proceso. La comunicación entre procesos se realiza mediante la técnica de paso de mensajes, la cual está implementada mediante el sistema de eventos del núcleo. Incluye una pila ligera TCP/IP y la pila Rime, que está diseñada especialmente para comunicaciones inalámbricas de baja potencia y cuenta con un amplio rango de primitivas de comunicación. También soporta IPv6, junto con protocolos como RPL4 (T. Winter et al., 2012) y 6LoWPAN, siendo este último el utilizado en este proyecto.

Funciona en una variedad de plataformas, desde microcontroladores embebidos a viejas computadoras domésticas. El tamaño del código está en el orden de los kilobytes y el uso de la memoria puede configurarse para que sea de sólo unas decenas de bytes.

En cada PMA, la Mainboard se encuentran conectadas mediante el puerto UART al IC CS5490. Se ha implementado un software, en lenguaje C, que realiza la recepción de la información relevante a las magnitudes leídas por los sensores - tensión, corriente, factor de potencia...-. Hace uso también del protocolo UDP (J. Postel, 1980) para realizar el envío de dicha información hacia la Unidad Central, cada determinado intervalo de tiempo. La unidad central se encarga de procesar los datos recibidos y almacenarlos en la BBDD.

Por otra parte, están dotadas de un software de control que recibe los mensajes de orden por parte de la Unidad Central, los procesa y ejecuta las acciones oportunas sobre la Actor Board, habilitando o deshabilitando el dispositivo en el que se encuentre integrada.

Además, contarán con el protocolo el *Constrained Application Protocol* – CoAP, (Z. Shelby et al., 2014) –, que las dotará de un acceso mediante HTTP para realizar consultas asíncronas de la información que obtienen del CS5490 y aquella referente al estado de la Actor Board. Igualmente permite el control remoto de la Actor Board, pudiendo así realizar la conexión/desconexión de los equipos.

Debido a que los nodos empleados en las redes de sensores inalámbricos – WSNs – presentan recursos bastante limitados, las aplicaciones instaladas en dichos dispositivos deberán realizarse en protocolos acorde con la capacidad de los nodos. Por ello, y como se ha comentado previamente, se opta por usar dos protocolos de comunicaciones óptimos para dispositivos con recursos limitados: el protocolo UDP y CoAP. Mediante la comunicación UDP las Motas Operadoras se comunican con la Unidad Central – a través de las Main Boards –, consiguiendo enviar y recibir mensajes con un

consumo de recursos muy reducido. Por otro lado, CoAP es un protocolo a nivel de aplicación especialmente diseñado para situaciones donde se trabaje con redes de sensores, permite también la comunicación *Mota - Unidad Central* – mediante peticiones por parte de la unidad central en este caso – , pero además proporciona una interconexión HTTP - *Hypertext Transfer Protocol* - proporcionando un acceso a las motas desde un pc conectado a la red y un explorador web -*Plugin de Mozilla Firefox* -.

## 4.5 SOFTWARE DE INTERFAZ DE USUARIO REMOTA

En primer lugar se describen los requisitos de la Intefaz de Usuario Remota, después se describen brevemente los dos Sistemas Operativos móviles donde se desplegará y finalmente se describe la Aplicación y la tecnología utilizada.

### 4.5.1 REQUISITOS DE LA APLICACIÓN DE USUARIO

Para el desarrollo de la aplicación de usuario se ha considerado que podrá ser utilizada por tres tipos diferentes de usuario con distintos niveles de acceso, por lo que se han definido tres roles:

**Usuario General:** accede a información para mejorar sus hábitos de consumo. Puede reportar incidencias.

**Técnico Operador:** accede a información detallada para resolver incidencias. Accede a todas las funciones de Usuario General

**Coordinador de Sistema:** puede establecer políticas de corte de suministro. Accede a todas las funciones de Técnico Operador.

Por lo tanto, los usuario deben registrarse cumplimentando un formulario al adquirir el producto e identificarse al iniciar la aplicación. Tras la identificación, el usuario accederá al centro de mando de la aplicación, desde donde podrá acceder a las diferentes opciones. En este centro de mando o menú sólo aparecerán las opciones permitidas para el tipo de usuario que esté utilizando la aplicación.

Las opciones de la aplicación se englobarán en acciones administrativas, acciones de visualización de parámetros o datos y acciones de configuración del sistema. A continuación se describen las vistas de la aplicación disponibles de forma general para cualquiera de los roles y las vistas específicas para cada uno de ellos.

#### Vistas de información generales – para todos los roles –

##### *Vista Principal*

Los datos que se podrán visualizar en esta vista son:

Lista de nodos de la red y de sensores y actuadores asociados.

Lista de alarmas configuradas.

Medidas de cada uno de los nodos.

Día del mes en curso.

Consumo actual de la instalación con actualización cada 5-10 segundos según rendimiento – kW –.

Consumo acumulado de la instalación desde el primer día del mes en curso – kWh –.

Consumo en un periodo determinado de tiempo a establecer por el usuario – kWh –.

Y si el sistema dispone de baterías se incluirá la siguiente información con los datos relativos al almacén de energía:

Consumo actual de la instalación con actualización cada 5-10 segundos según rendimiento – kW –.

Consumo acumulado de la instalación desde el primer día del mes en curso – kWh –.

Consumo en un periodo determinado de tiempo a establecer por el usuario – kWh –.

Estado de las baterías – porcentaje de carga –.

Rendimiento de conversión promedio.

Modo de funcionamiento del inversor/cargador.

Los datos sobre el consumo energético se podrán visualizar en forma de gráficos y se permitirá la opción de generar informes de consumo. Para ello, deberá realizarse un procesado y formateo adecuado de los datos recogidos por los nodos sensores.

#### *Vista Estudio de Dispositivo*

Presenta la curva de consumo de un dispositivo durante las últimas 24 horas. Sólo se puede acceder si existen dispositivos dados de alta. Dentro de esta vista las acciones posibles son:

Establecer un rango dentro de esas 24 horas cualquiera.

Guardar la curva de consumo del dispositivo en el rango establecido con un nombre descriptivo. El sistema extraerá la información de dicha curva para utilizarla en estudios posteriores. Por ejemplo: guardar 3 lavados de lavadora de distinta duración y configuración con los siguientes nombres:

30°C-centrifugado1200-carga3/10

0°C-centrifugado1200-carga5/10

50°C-centrifugado800-carga8/10

Las duraciones y picos de cada uno de estos lavados se guardarán con su correspondiente curva. Esto ayudará a diseñar una gestión óptima de nuestra energía.

Proponer una curva guardada. Se selecciona una de las curvas guardadas y se consulta al sistema si estaría en condiciones de soportarla. El sistema indicará si es o no posible – booleano –.

### *Gestión de Dispositivos*

En esta vista se enumeran los dispositivos dados de alta en el sistema. Las acciones posibles son:

Seleccionar un dispositivo para acceder a la Vista Estudio de Dispositivo.

Dar de alta un dispositivo.

Programación de encendido/apagado de los aparatos.

Establecimiento de la prioridad de aparatos o electrodomésticos. De ser necesario proceder a apagar equipos debido a límites de consumo establecido se comenzará desconectando aquellos con menor prioridad

### *Gestión del Gasto*

Por otro lado, las opciones de gestión del gasto permitirán configurar algunos parámetros que permitan a los usuarios controlar el gasto económico. En concreto, estas acciones incluyen:

Programación del coste por kWh – €/kWh –.



Configurar presupuesto mensual y establecer alertas al llegar a un valor de consumo o de coste máximo.

### Vistas específicas para el Usuario General

#### *Vista de Soporte*

En la vista de soporte específica para el Usuario General se podrá realizar la siguiente acción:

Reportar un problema al servicio de soporte. Se enviará un informe del sistema actual para agilizar su resolución.

### Vistas específicas para el Usuario Técnico Operador

#### *Vista de Estado de Dispositivos*

En esta vista se listarán los dispositivos y se podrá acceder a la siguiente información para cada uno de ellos:

Consumo instantáneo – kW –.

Dirección IPv6 asociada.

Historial de incidencias guardadas – incluye desconexiones, picos, y cualquier información que pueda reportar y que haya guardado el propio dispositivo –.

Además, en esta vista también se podrán realizar las siguientes acciones:

Aplicación de tests de autodiagnóstico sobre el sistema para comprobar direccionamiento, estado de consumos y otras incidencias. Genera un fichero de texto.

Accionamiento de apagados y encendidos de los relés instalados para comprobar su funcionamiento.

Calibración de dispositivos. Para esta calibración se introducirá la medida real en el momento de la calibración.

### *Vista de Estado del Controlador*

En la Vista de Estado del Controlador se podrán observar los siguientes datos relativos al controlador del almacén energético:

Estado de las baterías.

Reporte de incidencias del controlador.

Las acciones de esta vista se definirán por completo cuando se estudie en profundidad el sistema y sus características. Pero una de las acciones que seguramente se incluirá es:

Programación de alertas que indiquen que las baterías han alcanzado un valor preestablecido.

### *Vista Configuración Genérica*

En esta vista se podrán realizar tareas de configuración del sistema como:

Comprobación del estado de la red externa y de las comunicaciones.

Establecimiento del máximo de días de los que almacena información.

Visualización del estado de la memoria del Centro de Datos – *Data Logger* –.

Configuración de la red Wi-Fi para la comunicación ente los dispositivos móviles y el servidor interno.

Visualización del estado de los nodos.

Adición o eliminación nodos, sensores o actuadores.

Reconfiguración de los nodos para modificar el aparato conectado a cada nodo.

### Vistas específicas para el Coordinador del Sistema

#### *Vista de Asignación de Cortes*

Para finalizar, el Coordinador del Sistema podrá acceder a una vista específica para este rol de usuario en la que podrá:

Listar los cortes establecidos, generales y por dispositivo.

Establecer cortes y picos máximos de potencia por dispositivo.

Configurar la descarga máxima de la batería.

#### 4.5.2 SISTEMA OPERATIVO ANDROID

El sistema operativo Android fue creado inicialmente por la compañía Android Inc. en julio de 2005. Esta compañía fue adquirida por Google y en 2007 empezó a desarrollarse Android por la Open Handset Alliance, conglomerado de fabricantes, desarrolladores de hardware, software y operadoras de servicio, entre los que se encuentra, además de Google, empresas como Intel, HTC Corporation, Nvidia, Samsung o Sony.

Android es un sistema operativo libre, gratuito y multiplataforma basado en un *kernel* Linux. En Android las aplicaciones son desarrolladas principalmente en lenguaje de programación Java y ejecutadas en un *framework* Java de aplicaciones orientadas a objetos sobre los núcleos de las bibliotecas de Java. Para la ejecución se emplea una máquina virtual Dalvik basada en registros y con un modelo de compilación *just-in-time compilation* – JIT, compilación en tiempo de ejecución –. Este modelo de compilación consiste en traducir el *bytecode* a código máquina nativo en tiempo de ejecución mejorando considerablemente el rendimiento. Además soporta plataformas ARM, arquitecturas x86, MIPS e IBM Power.

En la Figura 39 se presenta la estructura del sistema operativo, en esta figura se observa como en el nivel más bajo se encuentra el núcleo Linux como capa de abstracción para el hardware disponible en los dispositivos. A continuación se encuentran las librerías utilizadas por Android que están escritas en C/C++ y que proporcionan al sistema operativo la mayor parte de sus capacidades más características. Al mismo nivel que estas librerías se encuentra el entorno de ejecución o *runtime* con las *Core Libraries* de clases Java y la máquina virtual Dalvik. En el nivel inmediatamente superior está el entorno o *framework* de aplicaciones que representa el conjunto de herramientas de desarrollo de cualquier aplicación. Finalmente en la capa más alta están incluidas las aplicaciones que son incorporadas por defecto y aquellas que haya añadido el usuario.

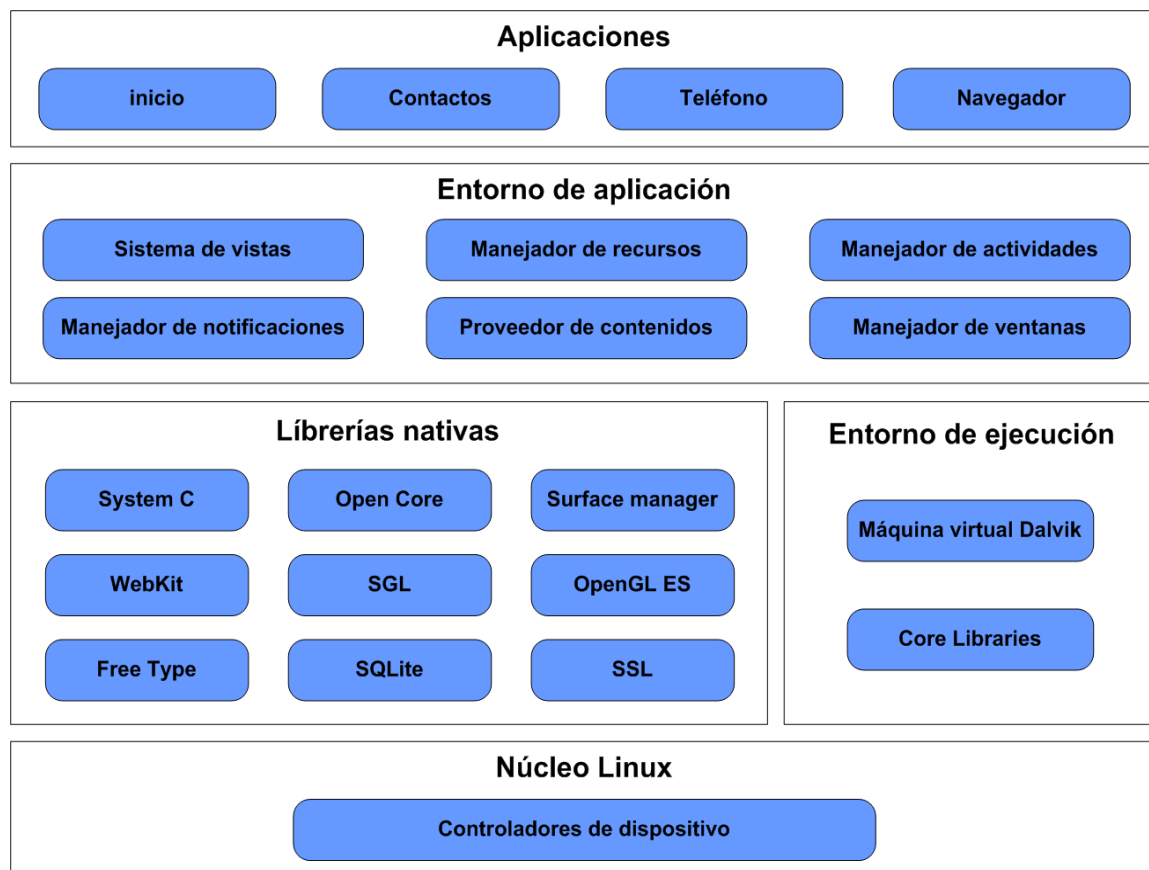


Figura 39. Estructura Android

Inicialmente este sistema operativo estaba orientado a dispositivos móviles como *smartphones* y *tablets*, de hecho incluye una serie de APIs para el uso de las distintas funciones de este tipo de aparatos: GPS, giroscopio, pantallas táctiles, cámaras de fotos, etc. No obstante, actualmente se encuentra presente en televisores, dispositivos domóticos, relojes, coches,...

#### 4.5.3 SISTEMA OPERATIVO IOS

El sistema operativo móvil iOS pertenece a Apple Inc. y fue lanzado al mercado por primera vez el 26 de junio de 2007, aunque no fue hasta la versión 4.0 que apareció la denominación iOS. iOS es un sistema operativo derivado de Mac OS X, que a su vez está basado en Darwin BSD. Por lo que se puede afirmar que iOS es un sistema operativo basado en UNIX.

Este sistema fue originalmente desarrollado para ser usado en el iPhone, aunque su uso se ha extendido al iPod Touch, iPad y el Apple TV. Sin embargo, al contrario de Windows Phone de Microsoft y Android de Google, Apple no ofrece licencias para la instalación de iOS en hardware de terceros.

iOS tiene cuatro capas de abstracción representadas en la siguiente Figura. La capa núcleo del sistema operativo abarca el entorno del núcleo, los controladores y las interfaces de bajo nivel del sistema operativo UNIX, también controla el sistema de memoria virtual, los hilos, comunicación entre procesos, los ficheros del sistema, la red y la gestión de procesos que interactúan directamente con el hardware. La capa de servicios principales permite al usuario acceder a todos los servicios básicos y contiene los servicios fundamentales del sistema operativo que pueden ser usados por todas las aplicaciones creadas por terceros. Algunos de estos servicios básicos son el almacenamiento en la nube – iCloud –, el conteo de referencias automáticas – ARC –, los *block objects*, la compra dentro de las aplicaciones, la biblioteca SQLite o el soporte XML. La capa Media o capa de medios de comunicación es una interfaz que permite la ejecución de tareas o gestión de ficheros multimedia. Para finalizar, la capa Cocoa Touch o capa táctil de Cocoa es la interfaz de los dispositivos para con el usuario. Esta capa implementa una aplicación gráfica orientada a eventos y define el soporte para multitarea, entradas táctiles, notificaciones y servicios de alto nivel.



Figura 40. Estructura iOS

Los dispositivos iOS no soportan Adobe Flash ni Java sino que utiliza HTML5 como una alternativa a Flash y al contrario que Android, iOS sólo soporta plataformas ARM. Por último, es necesario señalar que para desarrollar aplicaciones para iOS es necesario adquirir el kit de desarrollo de software o SDK y pagar la cuota del *iOS Developer Program*.

#### 4.5.4 DESARROLLO INTERFAZ USUARIO REMOTO

El desarrollo de las aplicaciones móviles se ha desarrollado sobre el *Framework Ionic* (“Ionic Website,” n.d.), que posibilita la creación de un único código fuente para su posterior compilación en los sistemas operativos Android e iOS y esta bajo *licencia MIT*. Ionic se basa en AngularJS y los plugins de Cordova en su modelo de gestión de estados, enlace de datos y codificación. De esta forma desarrollar una App móvil es equivalente a realizar una web con AngularJS lo que facilita mucho la reutilización de conocimientos y de herramientas propias de angular. AngularJS a su vez se sustenta sobre HTML5, CSS3 y Javascript para producir aplicaciones web de gran rendimiento.

Los plugins desarrollados para Cordova, otra iniciativa de código único y renderizado HTML para desarrollar Apps para móviles de Apache.org, son accesibles a través del Ionic Framework para acceder a cada uno de los elementos propios del entorno móvil. El esquema general es el representado en la siguiente Figura.

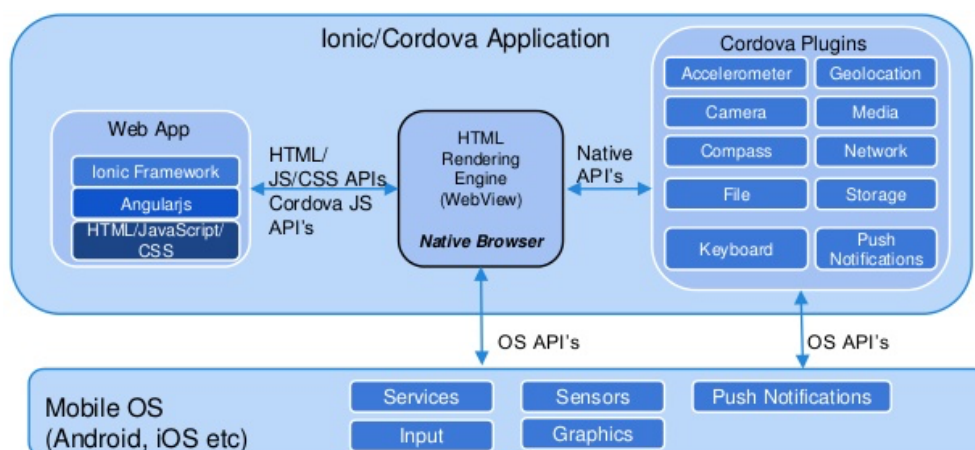


Figura 41. Ionic Framework

Ionic utiliza un motor de renderizado HTML para procesar cada una de las vistas. A través de los plugins de Cordova accede a los elementos propios del entorno móvil de forma que el App puede realizar acciones en base a movimientos detectados por el acelerómetro, la geolocalización o los distintos gestos que se pueden realizar en la pantalla de los nuevos dispositivos táctiles.

La interfaz desarrolla dentro del alcance de este trabajo realiza la representación de datos actuales e históricos en forma de gráficas.

## 4.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se han descrito cada uno de los componentes software que forman el sistema. Se han dividido en dos grandes grupos acordes al entorno donde se aloja el software.

Por un lado se ha descrito el software de la Unidad Central que lleva el mayor peso de las operaciones de comunicación, captación y agrupación de datos, interfaz con el usuario y comunicación con la nube. La mayor parte se ha desarrollado en *Python 3.x* sobre *Linux*, utilizando librerías propietarias para la comunicación con la interfaz de usuario local – *PICASO de 4D Labs* –, la comunicación con la Unidad de Control de Potencia – *MK2* – y la comunicación con la nube – *Google Cloud Datastore* –. También se incluye la descripción de la unidad MainBoard que realiza las funciones de Gateway en la Unidad Central.

Por otro lado se ha descrito el software que se aloja en los PMAs, un entorno altamente restrictivo de operación. Donde se ha desarrollado la totalidad del código en *C* sobre *Contiki OS*.

Se ha tenido en cuenta aspectos relativos a la seguridad en las comunicaciones y almacenamiento de datos en la nube, así como las distintas

Por último se han descrito los requisitos de la Interfaz Remota de Usuario sobre dispositivos móviles y su desarrollo utilizando el *Framework Ionic*, que posibilita la creación de un código fuente para su posterior compilación en cada uno de los principales sistemas operativos móviles – *Android* e *iOS* –.





## CAPÍTULO 5. DESPLIEGE Y ANÁLISIS DEL PROTOTIPO

A continuación se describe como se ha desplegado el sistema en un entorno real y que consideraciones se han tenido en cuenta relacionadas con la seguridad del mismo. Así mismo se han analizado los resultados de la operación del sistema en tiempo real.

## 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el despliegue del sistema, realizado a finales de 2014 y ha estado operativo sin mayor incidencias durante todo 2015. La vivienda seleccionada está ocupada por dos adultos y un niño con un consumo medio. Durante el 2015 el sistema no ha dado problemas graves, si bien se han ido ajustando la Unidad Central para mejorar el software de la misma y actualizarlo. La comunicación con la nube se realizó a finales de 2015, por lo que los datos que se han obtenido son los resúmenes almacenados en la memoria de la Unidad Central.

En este capítulo también se describen las consideraciones de seguridad que se han tenido en cuenta para el despliegue del sistema.

## 5.2 DESPLIEGUE DEL PROTOTIPO

### 5.2.1 CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD DURANTE EL DESPLIEGUE

En cuanto a la seguridad eléctrica, se siguen la guía de aplicación ITC-BT-19 para instalaciones interiores o receptoras, y la normativa para instalaciones eléctricas de baja tensión según las normas UNE-HD 60364-5-54: selección e instalación de los equipos eléctricos; puesta a tierra, conductores de protección y conductores de equipotencialidad y UNE-HD 60364-5-52: selección e instalación de equipos eléctricos; canalizaciones. En base a ello se realizan las protecciones detalladas a continuación:

El sistema cuenta con su propio ID - *Interruptor Diferencial* - eléctrico, que se encarga de cortar la alimentación, desde la red eléctrica externa, del inversor y, a su vez, de todo el hogar, que se encuentra conectado a la salida del inversor. El hipotético corte se produciría con el fin de proteger a las personas de los contactos directos e indirectos provocados por el contacto con partes activas de la instalación – contacto directo – o con elementos sometidos a potencial debido, por ejemplo, a una derivación por falta de aislamiento de partes activas de la instalación – contacto indirecto -. También protege la instalación y el hogar contra los incendios que pudieran provocar dichas derivaciones.

Además, el sistema desplegado dispone de un segundo ID conectado a la salida de corriente del inversor, su función es desconectar esta salida de la entrada de corriente del hogar, en caso de que se diera cualquiera de los casos anteriormente comentados, pero en cualquier punto existente desde la salida del inversor hacia adentro del hogar esta vez.

Del mismo modo, cuenta con un PIA – Pequeño Interruptor Automático –, compuesto por un *desconectador magnetotérmico*, conectado a la entrada del inversor, que interrumpe la conectividad eléctrica en el caso de que el inversor demande más potencia de la que admite a su entrada – 30 A -. A la salida del inversor existe otro PIA que protege, en este caso, de que la vivienda no demande más potencia de la que el inversor puede ofrecer a su salida - potencia extraída de la red eléctrica y/o las baterías -.

Además de estas protecciones, en la instalación se han incluido dos conectores de seguridad para alimentar al inversor desde la red y para conectar su salida de potencia a la vivienda. Estos conectores cuentan con un mecanismo de protección que evita que puedan ser desconectados involuntariamente – por tirones de los cables, por ejemplo -.

Por último, el sistema cuenta con un conmutador que hace posible la conexión/desconexión completa del mismo con el hogar, en caso de que fuera necesario por un incorrecto funcionamiento del mismo o para labores de mantenimiento, dejando la red eléctrica interna de la vivienda conectada de manera directa – sin inversor por medio – a la red eléctrica del proveedor.

Para finalizar, todos los dispositivos del sistema con conexión eléctrica se han conectado debidamente a tierra, bien de manera directa o bien a través de sus respectivos transformadores de alimentación, incluyendo sensores, pantalla, mini PC, etc.

En la siguiente figura se observa un esquema de las conexiones eléctricas del inversor y las baterías a la vivienda, y de los dispositivos de protección.

#### 5.2.2 ESQUEMA DE DESPLIEGUE

El sistema se desplegó a finales de 2014 y ha estado operativo sin mayor incidencias durante todo 2015. La vivienda seleccionada está ocupada por dos adultos y un niño con un consumo medio.



*Figura 42. Despliegue real del sistema.*

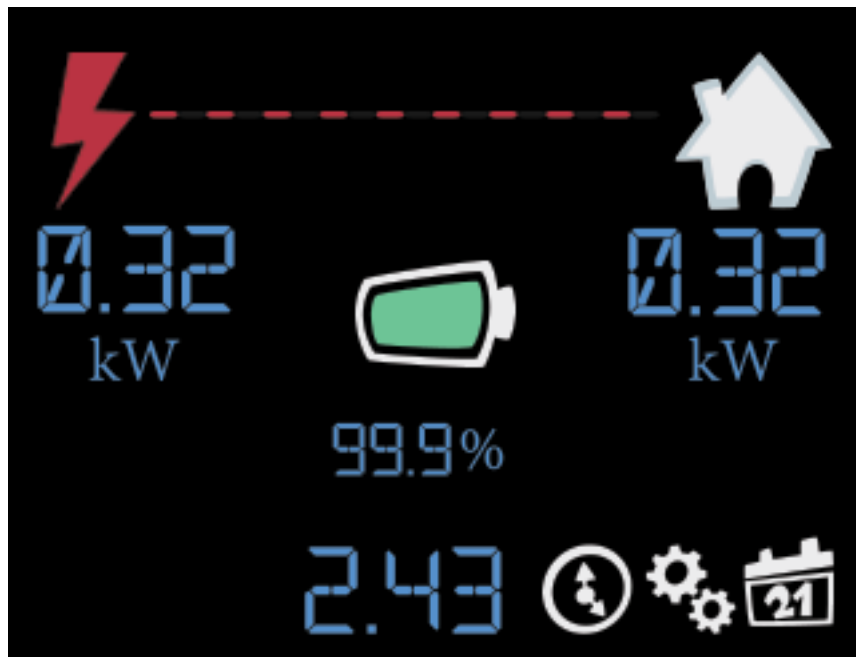
En la figura anterior se pueden observar los distintos componentes principales del sistema interconectados y operativos.

La red de sensores sólo ha podido ser validada en laboratorio, desplegándola en de forma que se midan cargas simuladas y comprobando la comunicación entre los nodos. No se han incorporado algoritmos complejos de gestión de energía entre los nodos aunque si se ha dejado planteado en el sistema.

### 5.2.3 MODOS DE OPERACIÓN

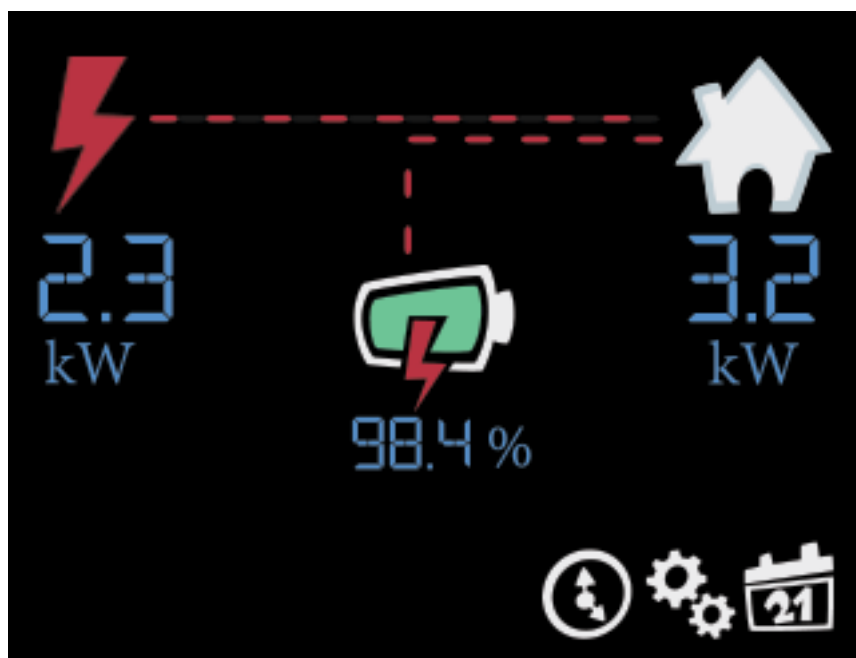
A comunicación se muestran los distintos modos de operación y como estos se representan en la pantalla LED de la Unidad Central.

**Modo normal o directa.** Si las baterías están cargadas y no existe ninguna otra incidencia, se conecta directamente la instalación con la toma externa.



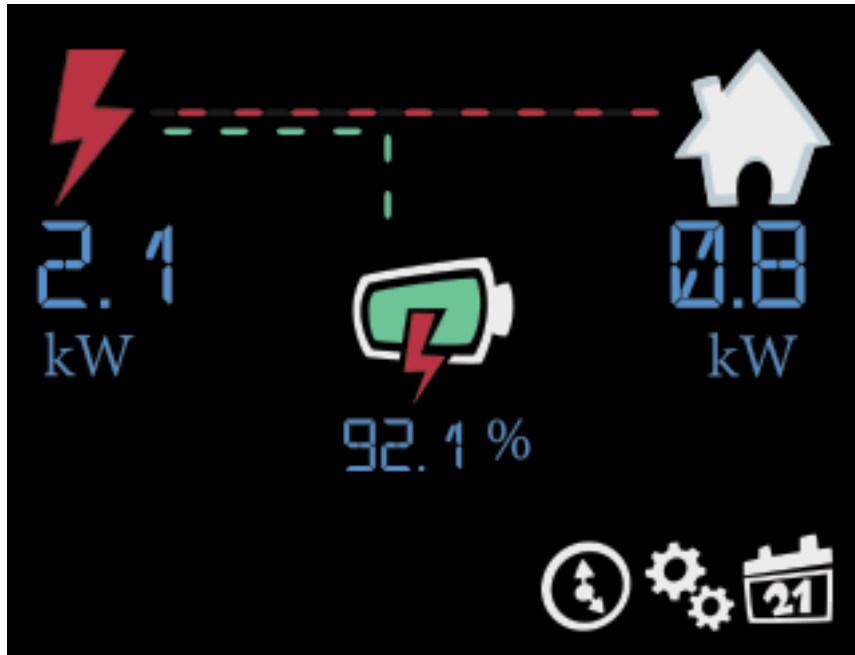
*Figura 43 Modo de Operación Directa - Normal -*

**Modo potencia o sobrepotencia.** También puede ocurrir que se requiera un mayor nivel de potencia, en este caso el inversor/cargador realiza el suministro de energía empleando tanto la red eléctrica externa como las baterías.



*Figura 44 Modo de operación de sobrepotencia - batería + proveedor CA -*

**Modo normal en carga o carga de baterías.** La fuente de energía de la instalación eléctrica es la toma de corriente externa de la vivienda u oficina, y el inversor/cargador se encarga de dejar pasar la corriente directamente y a la vez realizar la carga de las baterías.



*Figura 45 Modo Carga de Batería*

**Modo batería.** O modo Sistema de Alimentación Ininterrumpida – SAI -. En el caso de una caída del suministro de la red eléctrica el inversor/cargador se encarga de conmutar y utilizar las baterías como fuente de energía.

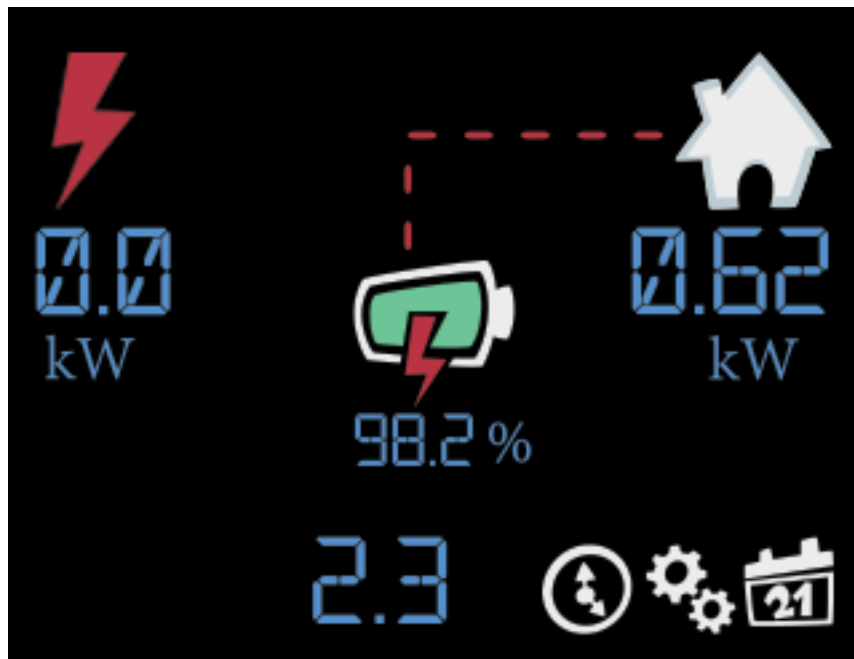


Figura 46 Modo Sistema Ininterrumpido de Alimentación - SAI –

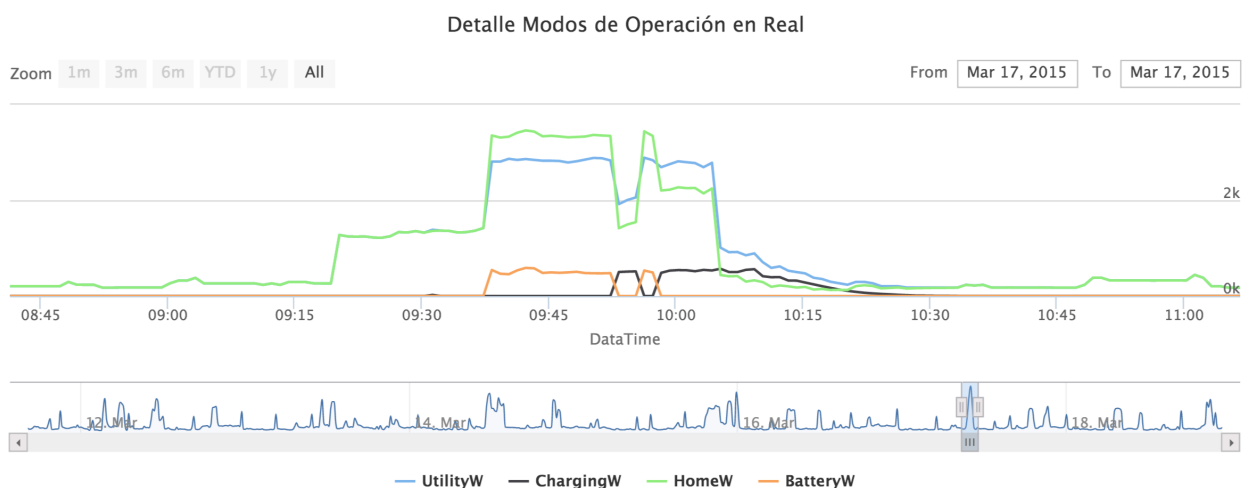


Figura 47. Representación en la gráfica de potencias de cada uno de los modos de operación.

Como puede apreciarse entre las 9:37 y las 10:06 de la mañana del 17 de Marzo de 2015 se producen dos picos que superan los 2,6kW contratados en la instalación. Se observa como estos dos picos son cubiertos por la acción del Inversor al obtener energía continua de las baterías y sumarla en la red doméstica a la obtenida del exterior de forma que se llega a cubrir el total de la demanda que supera los 3kW. Cada vez que se supera un pico de demanda el sistema activa el Cargador de la batería para volver a llevar su nivel de carga al máximo y estar preparado para el siguiente incremento de la demanda.



### 5.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para analizar los resultados se han usado los datos de una semana de marzo normal. La decisión de usar una semana se ha basado en que contiene los patrones de consumo de días laborables y festivos que predominan en todo el año. Desafortunadamente no se dispone de los datos de todo el año para realizar un estudio completo, aunque se incluyen los agregados de los últimos seis meses de operación en real, el último semestre de 2015.

#### 5.3.1 SEMANA DE OPERACIÓN EN REAL

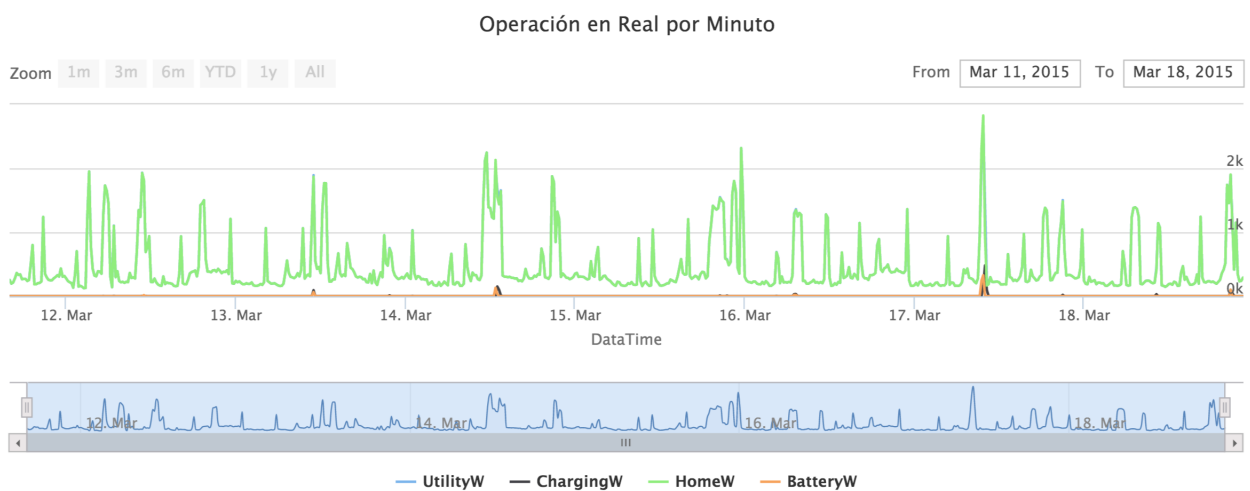


Figura 48. Datos reales usados para la obtención de ratios de eficiencia.

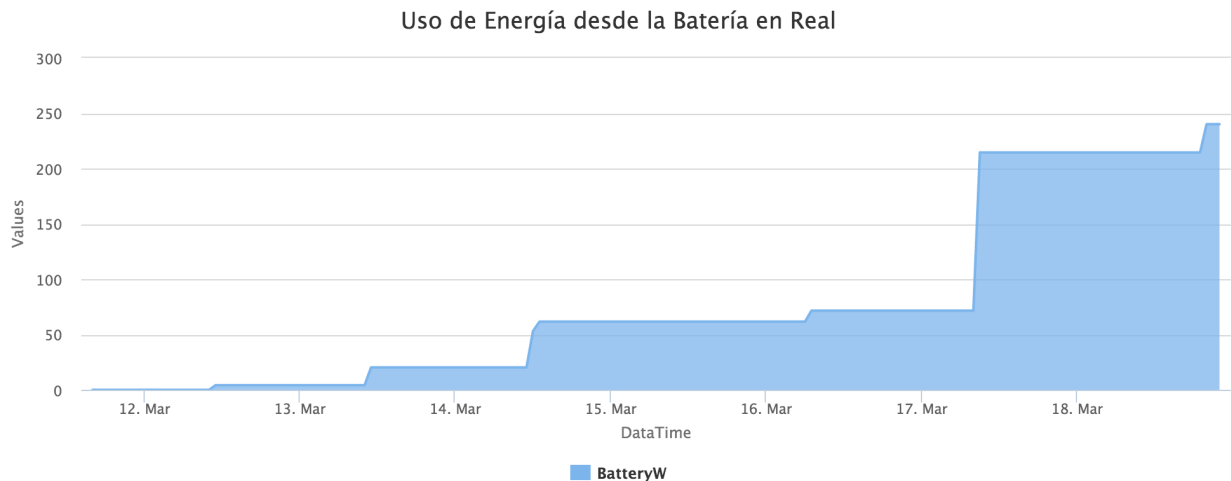


Figura 49. Evolución de la energía proporcionada por la batería a lo largo de la semana.

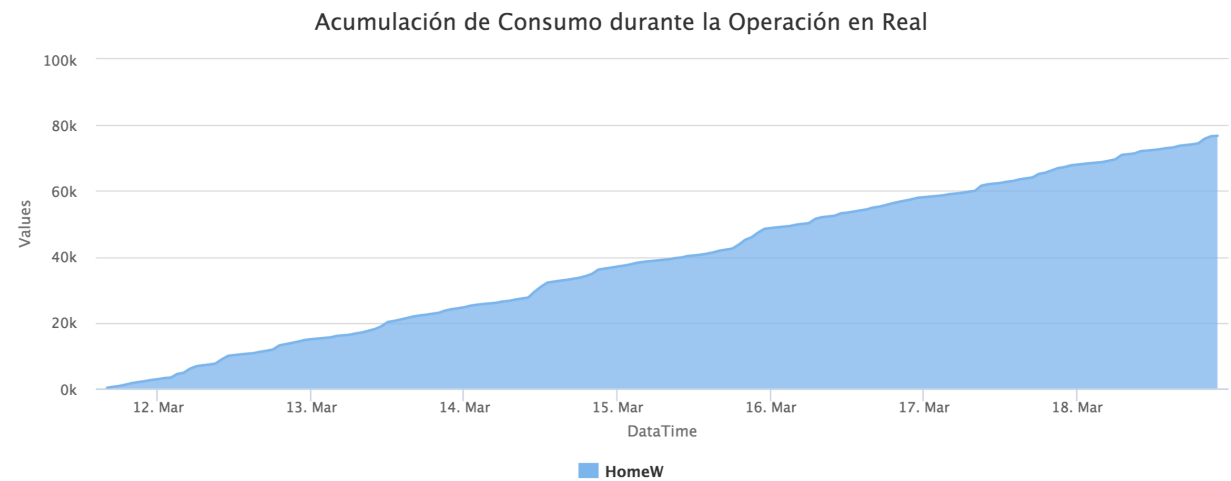


Figura 50. Evolución del consumo de la vivienda a lo largo de la semana.

En los 7 días tomados como muestra el factor de eficiencia de la unidad de almacenamiento de energía ha sido del 66,48%. Teniendo en cuenta que se han tenido que suministrar 361,08W para recargas y corrientes de mantenimiento frente a los 240,07 aportados a la red de la vivienda.

Sin embargo, el factor de potencia del sistema en su conjunto asciende al 99,85%, debido a que del total de energía obtenido de la red eléctrica, 76.746,53W se han aprovechado en la vivienda un total de 76.859,88W. Este dato, nos indica que se puede reducir a la mitad la potencia contratada sin apenas penalizar en el consumo total.

En la siguiente tabla se muestran los valores estadísticos representativos de la muestra de potencias que se han obtenido durante la semana de operación monitorizada. La potencia máxima obtenida de la batería – BatteryW en la tabla – ha sido de 3.689W, mientras que la total demandada por la casa ha

sido de 5.758W. A pesar de tener contratados 10 Amperios a 230 Voltios en la vivienda observamos que en pico esta candida se ha superado en algún pico, llegando hasta los casi los 14 Amperios con una potencia de 3.061W. La carga de la batería – ChargingW en la tabla – no ha superado los 586W ya que las baterías se cargan más lentamente de lo que se descargan.

*Tabla 9. Datos estadísticos sobre los valores obtenidos en la muestra real.*

	<i>UtilityW</i>	<i>HomeW</i>	<i>ChargingW</i>	<i>BatteryW</i>
<b><i>Count</i></b>	<i>628120</i>	<i>628120</i>	<i>628120</i>	<i>628120</i>
<b><i>Mean</i></b>	<i>438.651</i>	<i>438.298</i>	<i>2.016</i>	<i>1.533</i>
<b><i>std</i></b>	<i>477.874</i>	<i>483.150</i>	<i>26.295</i>	<i>34.285</i>
<b><i>min</i></b>	<i>90</i>	<i>90</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<b><i>25%</i></b>	<i>206</i>	<i>206</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<b><i>50%</i></b>	<i>269</i>	<i>269</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<b><i>75%</i></b>	<i>359</i>	<i>358</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<b><i>max</i></b>	<i>3061</i>	<i>5758</i>	<i>586</i>	<i>3698</i>

### 5.3.2 PROYECCIÓN DE RESULTADOS

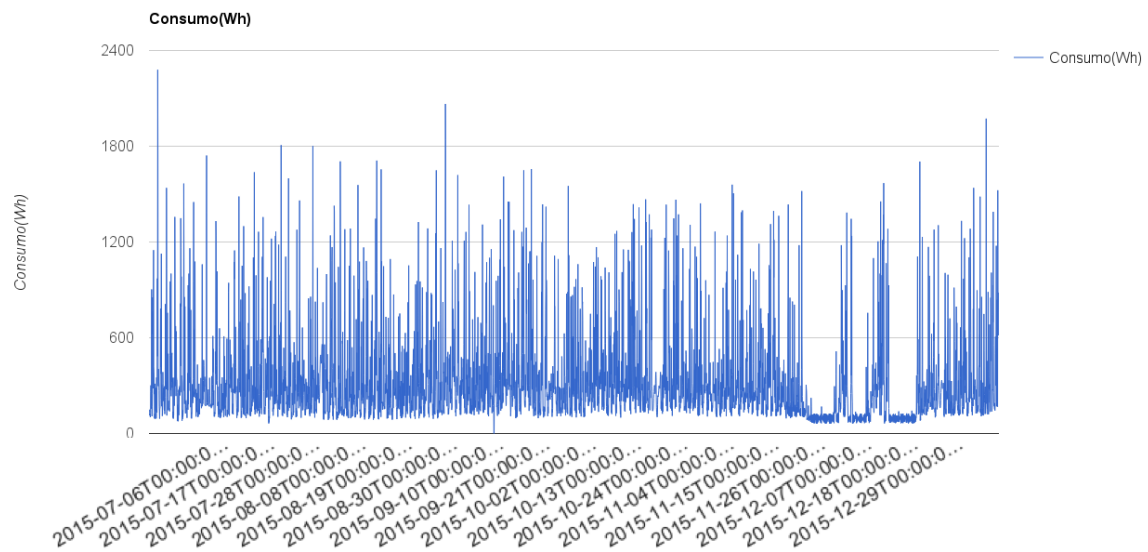


Figura 51. Grafica de consumo horario del último semestre.

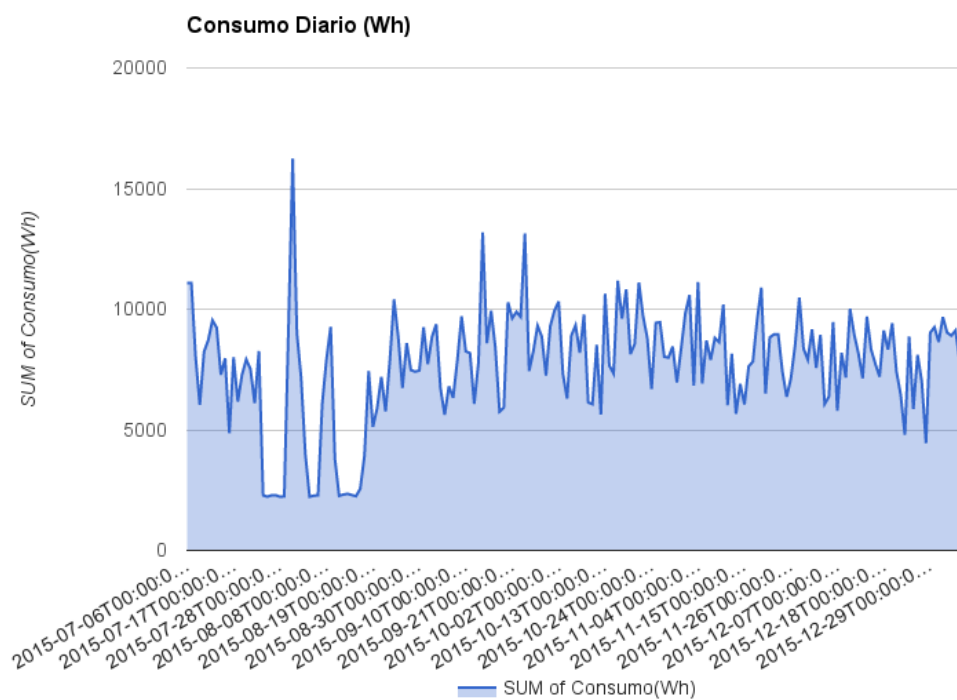


Figura 52. Consumo diario del segundo semestre de 2015.

En las siguientes dos tablas se exponen los datos mensuales de todo el año 2015. En la primera tabla los reales obtenidos de la facturación realizada por la empresa suministradora. En la segunda los

calculados según el consumo realizado con una potencia un 100% por encima de la realmente contratada.

### 5.3.3 ESTUDIO DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y COSTES

*Tabla 10. Estudio de Costes Anuales con el Sistema Implantado.*

<b>Mes</b>	<b>Consumo (kWh)</b>	<b>Total (€)</b>	<b>Precio medio (€/kWh)</b>	<b>Precio Potencia</b>	<b>Precio Energía</b>	<b>Impuestos</b>	<b>Descuentos</b>
<b>1</b>	224	29.58	0.1250892857	7.42	28.02	3.01	-8.87
<b>2</b>	261	31.83	0.1191954023	7.15	31.11	3.14	-9.57
<b>3</b>	290	35.48	0.1165517241	8.74	33.8	3.58	-10.64
<b>4</b>	225	29.88	0.1234666667	7.95	27.78	3.08	-8.93
<b>5</b>	222	28.16	0.1183333333	7.42	26.27	2.89	-8.42
<b>6</b>	238	32.35	0.1270588235	8.48	30.24	3.31	-9.68
<b>7</b>	207	29.71	0.1318357488	8.21	27.29	3.09	-8.88
<b>8</b>	179	25.25	0.1252513966	7.68	22.42	2.68	-7.53
<b>9</b>	271	33.63	0.1174169742	8.48	31.82	3.41	-10.08
<b>10</b>	268	33.19	0.117761194	8.21	31.56	3.36	-9.94
<b>11</b>	228	29.93	0.1247368421	7.42	28.44	3.03	-8.96
<b>12</b>	281	34.9	0.1155516014	9.27	32.47	3.6	-10.44

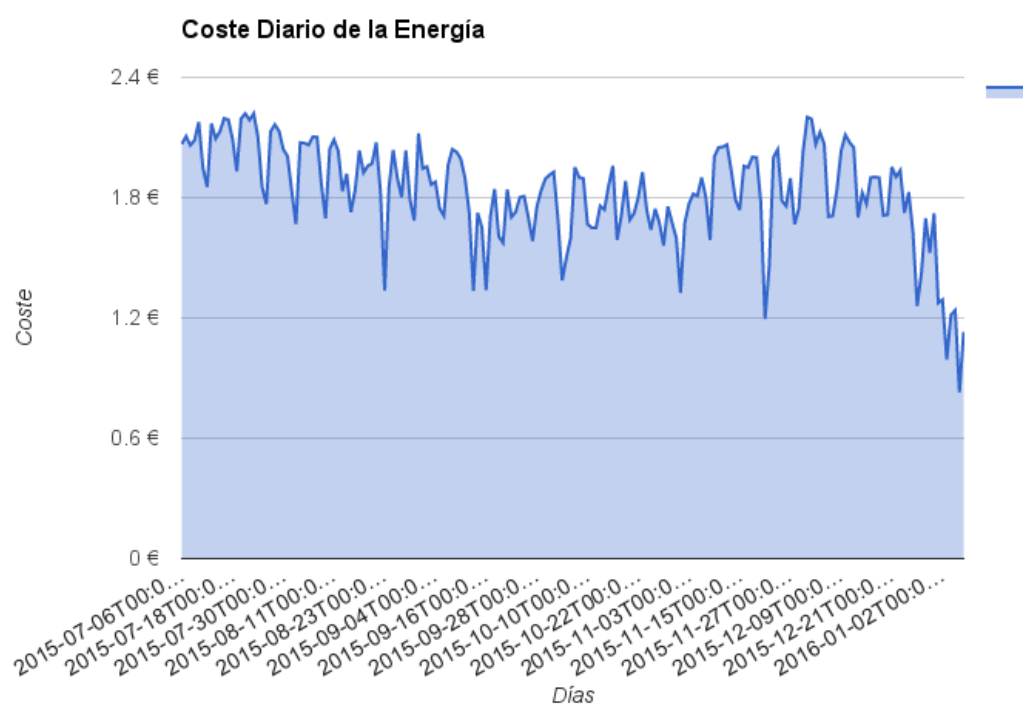
<b>Totales:</b>	<b>2894</b>	<b>373.89</b>	<b>0.1218540827</b>	<b>96.43</b>	<b>351.22</b>	<b>38.18</b>	<b>-111.94</b>
-----------------	-------------	---------------	---------------------	--------------	---------------	--------------	----------------

*Tabla 11. Estudio de Costes Anuales con el Sistema No Implantado.*

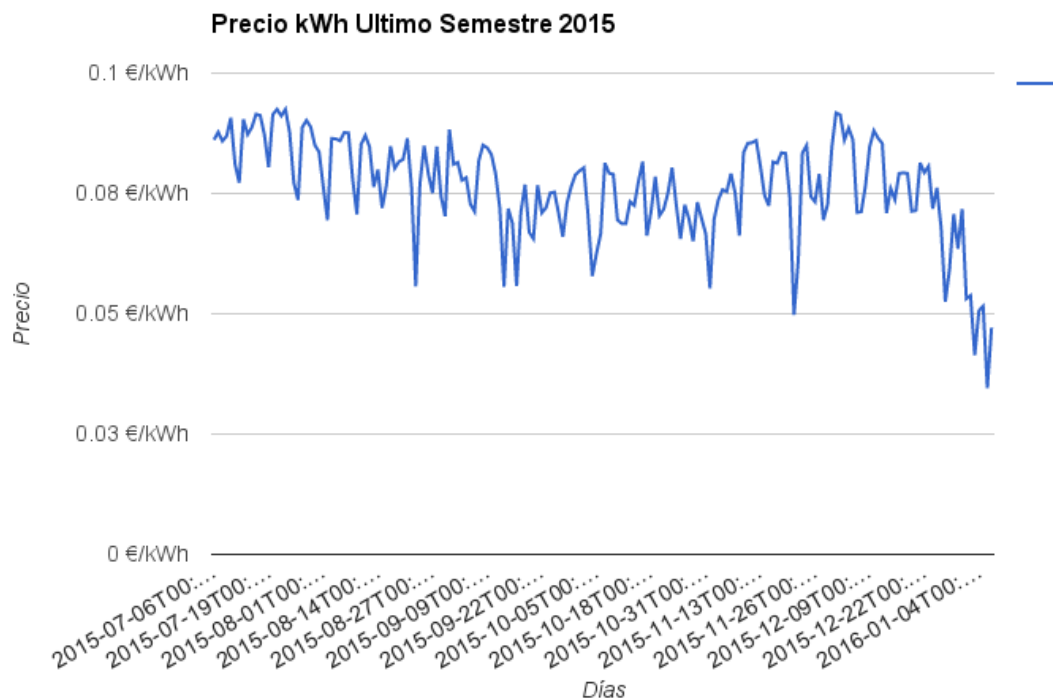
<b>Mes</b>	<b>Consumo (kWh)</b>	<b>Sin Sistema</b>	<b>Precio medio (€/kWh)</b>	<b>Precio Potencia</b>	<b>Precio Energía</b>	<b>Impuestos</b>
<b>1</b>	224	49.51	0.1250892857	14.84	28.02	6.65
<b>2</b>	261	52.16	0.1191954023	14.3	31.11	6.75
<b>3</b>	290	59.19	0.1165517241	17.48	33.8	7.91
<b>4</b>	225	50.63	0.1234666667	15.9	27.78	6.95
<b>5</b>	222	47.62	0.1183333333	14.84	26.27	6.51
<b>6</b>	238	54.67	0.1270588235	16.96	30.24	7.47
<b>7</b>	207	50.78	0.1318357488	16.42	27.29	7.07
<b>8</b>	179	44.13	0.1252513966	15.36	22.42	6.35
<b>9</b>	271	56.38	0.1174169742	16.96	31.82	7.60
<b>10</b>	268	55.40	0.117761194	16.42	31.56	7.42
<b>11</b>	228	49.97	0.1247368421	14.84	28.44	6.69
<b>12</b>	281	59.13	0.1155516014	18.54	32.47	8.12

<b>Totales:</b>	2894	629.57	0.1218540827	192.86	351.22	85.49
-----------------	------	--------	--------------	--------	--------	-------

En las siguientes dos figuras se representa el coste real de la energía en el último semestre de 2015, así como la evolución del precio de la misma



*Figura 53. Coste por día de energía real en el último semestre de 2015*



*Figura 54. Evolución del precio del kWh en el último semestre de 2015*

A continuación se exponen los datos totales de costes energéticos de la vivienda donde se ha implantado el sistema.

Coste total con Sistema: 373,89 €

Coste total sin Sistema: 629,57 €

Ahorro Con Sistema: 40.65%.

Se puede apreciar un ahorro considerable debido a la reducción del coste por potencia contratada – se ha estimado una reducción del 50% - así como por las bonificaciones.

Ahorro con Sistema sin bonificaciones: 22.88%. Según la regulación actual, todas las potencias contratadas por debajo de los 3kW acceden automáticamente a un modelo de tarifa bonificado con aplicación de precios fijos muy por debajo de los actuales.



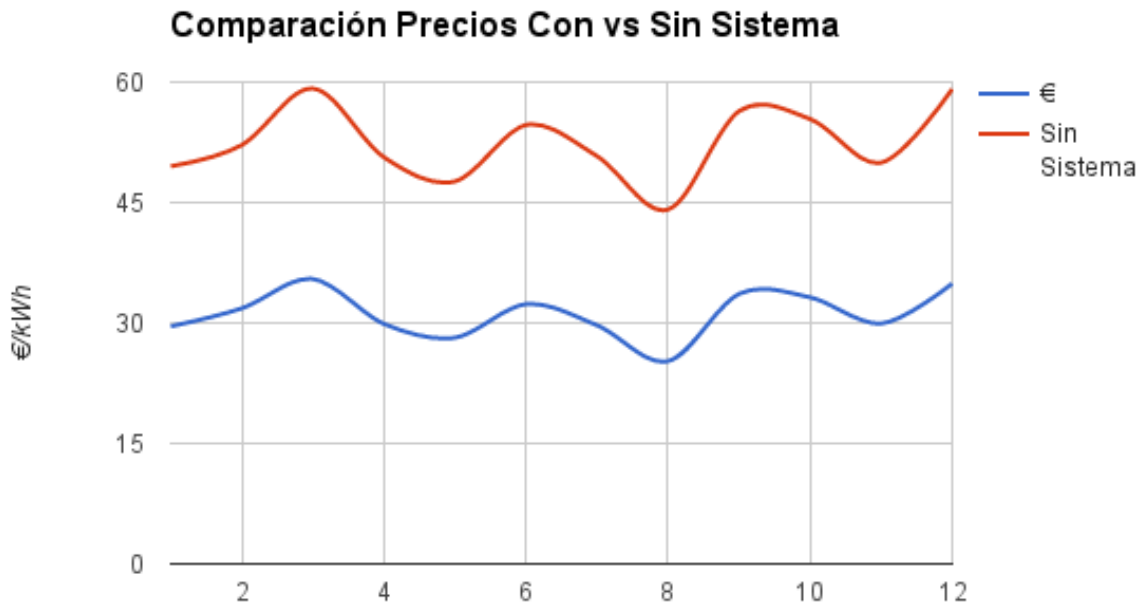
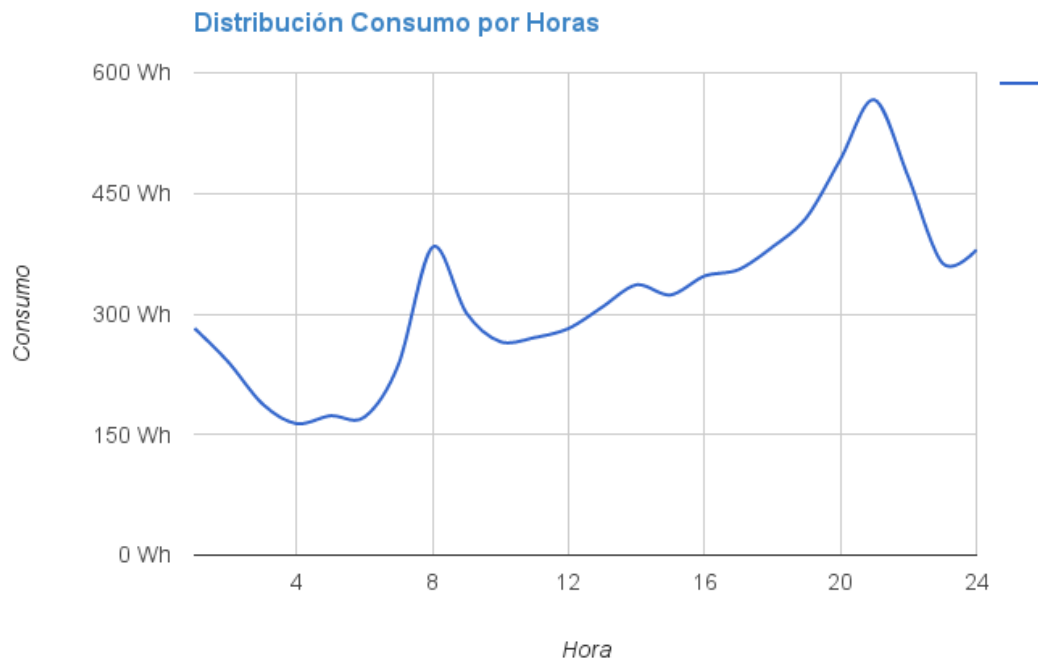


Figura 55. Comparación de costes mensuales con y sin sistema.

En la figura anterior se puede apreciar una clara mejora en el coste del consumo energético mes a mes, la mejora se mantiene constante ya que no se ha estimado ningún ahorro en el gasto energético en cuanto a la cantidad de energía consumida.

#### 5.3.4 RELACIÓN DIRECTA ENTRE EL PRECIO Y LA DEMANDA

A continuación se exponen la relación de los precios y la demanda en cada hora del día, esto nos da una idea de las posibilidades de reducción de costes que podríamos llegar a obtener con el sistema si fuéramos capaces de utilizar la energía de los valles de la curva en los picos, es decir, almacenarla varias horas para su posterior uso. También podrían aplicarse políticas para evitar la carga del sistema en los horarios pico de forma que solo se utilice la energía almacenada en los sobre picos y sólo se cargue en horario de madrugada donde el precio es siempre más reducido.



*Figura 56. Curva armonizada de consumo diario.*

En la figura anterior podemos apreciar una curva típica de consumo de energía con dos valles en las madrugadas y en el periodo laboral – incluye festivos y fines de semana en los datos de ahí que no sea tan pronunciada como una curva que use únicamente datos de días laborables –.

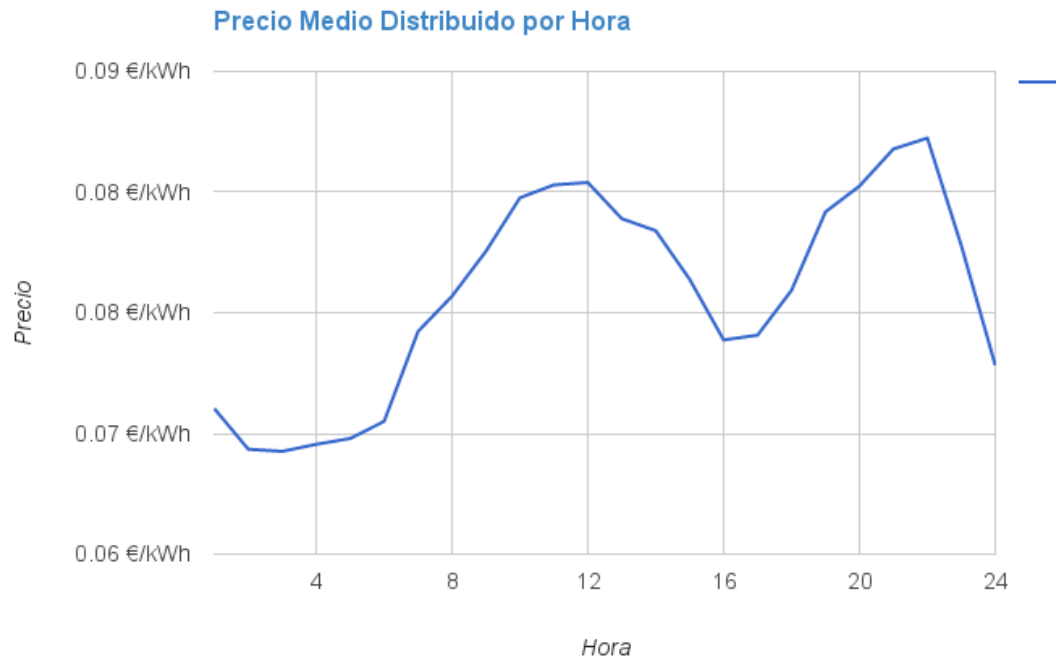


Figura 57. Distribución armonizada del precio de la energía por horas.

Se aprecian claramente dos valles de precios en las madrugadas y en las horas de cierre de las empresas – sobre las 16 horas –.

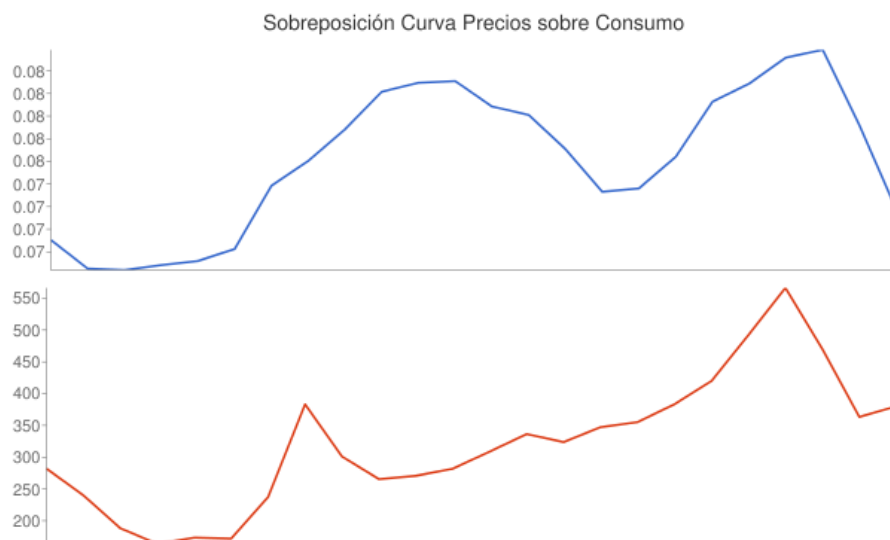


Figura 58. Superposición de la demanda armonizada contra el precio de la energía por horas.

Como se puede apreciar a simple vista en la figura anterior, el precio de la energía – en azul – está muy relacionado con la curva de demanda, con un ligero incremento en los horarios laborales donde las empresas demandan más energía que los hogares.

## 5.4 CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados del sistema operando en real, con ejemplos de la operación de cada modo de operación salvo el de alimentación ininterrumpida ya que este no se ha producido durante la operación del sistema. Se puede observar como el sistema armoniza la curva de demanda sobre la red externa, reduciendo el pico de instalación en un 50%, con el correspondiente ahorro de costes que llega hasta el 40% para la instalación prototipo durante todo el 2015.

Se establecen los ratios de eficiencia del sistema en general, que debido a los pocos periodos de alta demanda y a la sobre-dimensión de las baterías supera el 98%. Se presenta aquí la posibilidad de reducir el coste del sistema instalando una capacidad de almacenamiento menor, aunque todo dependerá de los hábitos de los consumidores en cada instalación.

No se ha podido cuantificar el ahorro por tener un sistema informado debido a que durante el 2014 había una diferencia en el número de ocupantes de la vivienda por lo que no se ha podido tomar como referencia.



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

A continuación se exponen las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este proyecto, así como las líneas de trabajo futuras que se han detectado durante el mismo.

## 6.1 CONCLUSIONES

Se ha diseñado un Sistema capaz de armonizar la curva de demanda desde el punto de demanda, reduciendo el pico necesario en la instalación y manteniendo comunicación con la nube para almacenar los datos de forma periódica.

Así mismo el sistema se ha implantado con éxito y ha estado operativo durante un año – únicamente la Unidad Central –.

Se va validado el uso de la Red de Sensores Inalámbricos en laboratorio. Comprobando que se comunican entre ellos a través del protocolo 6LoWPAN y son accesibles a través de direccionamiento IPv6, incorporándolos en el *Internet of Things*.

Se ha demostrado que es posible una reducción del 50% del pico de potencia instalada, en el caso de demostración se ha reducido desde 5.2 kW a 2.6 kW.

Se ha comprobado la mejora económica, con una reducción comprobada del 40% durante la operación en el año 2015.

No se dispone de datos sobre la mejora en el consumo ya que ha variado la configuración de habitantes de la vivienda desde 2014. Pero si se han detectado cambios en los hábitos de consumo y una mayor conciencia sobre el uso energético.

Se ha posibilitado el estudio de los datos del consumo a un nivel de detalle imposible antes de la implantación del sistema. Estos serán aún mayores cuando se incorporen los datos de la WSN



## 6.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Se han detectado la siguientes líneas de trabajo futuras:

Sería conveniente trabajar hacia un estándar para la provisión de datos a la productora eléctrica. De forma que esta provea los interfaces y protocolos necesarios para obtener previsiones de demanda por unidad de consumo y de esta forma pueda anticiparse a esta.

Realizar políticas y los algoritmos de gestión asociados a estas para la gestión de energía basada en los puntos de mayor consumo. De forma que se optimice aún más el consumo y el costes asociado, por ejemplo, apagando el termo eléctrico durante los periodos de inutilización, impidiendo activar a los grandes consumidores durante los periodos de más coste energético o al menos avisando de ellos.

Mejorar la capacidad de almacenamiento a través de la conexión de baterías comunitarias. De forma que pueda compartirse el costes de la mismas y buscar arquitectónicamente lugares habilitados para el despliegue de baterías estacionarias más voluminosas, por ejemplo, los cuartos de contadores eléctricos.

Adaptar el diseño para incluir sistemas trifásicos a través de la conexión en paralelo de inversores. De forma que se pueda utilizar el sistema para potencias de más de 10 kW.

Realizar estudio sobre hábitos de consumo a más amplia escala incluyendo varios demostradores en entornos urbanos y rurales y con diferentes configuraciones de electrodomésticos y habitantes en las viviendas o usuarios en las oficinas. También conviene considerar el impacto de grandes consumidores como los sistemas de refrigeración.

### 6.3 ARTÍCULOS PUBLICADOS

- Juan A. Vera et al. Problem Solving for Wireless Sensor Networks, Book Contributors, Computer Communications and Networks, 2008
- Riquelme, J. L., Soto, F., Suardiaz, J., Sánchez, P., Iborra, A., & Vera, J. A. 2009. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1), 25-35.
- López, J. A., Soto, F., Sánchez, P., Iborra, A., Suardiaz, J., & Vera, J. A. 2009. Development of a sensor node for precision horticulture. *Sensors*,9(5), 3240-3255.
- Lopez, J. A., Soto, F., Suardiaz, J., Sanchez, P., Iborra, A., & Vera, J. A. 2009, November. Development of a mote for horticulture based on the SDI-12 standard. In *Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE* (pp. 2630-2635). IEEE.
- Vera-Gomez, J. A., Quesada-Arencibia, A., Garcia, C. R., Suarez Moreno, R., & Guerra Hernandez, F. 2015, September. GUIATE, A System for Urban Parking Areas Management. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on* (pp. 2600-2605). IEEE.
- Vera-Gomez, J. A., Quesada-Arencibia, A., García, C. R., Suárez-Moreno, R., & Guerra-Hernández, F. 2015. Intelligent Management of Parking Lots in Urban Contexts. In *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence. Sensing, Processing, and Using Environmental Information* (pp. 499-504). Springer International Publishing.

## BIBLIOGRAFÍA

- Advanced Encryption Standard (AES) (No. 197), 2001. , Processing Standards Publication.
- Al-Anbagi, I., Erol-Kantarci, M., Mouftah, H.T., 2012. Low-latency smart grid asset monitoring for load control of energy-efficient buildings, in: Smart Grid Engineering (SGE), 2012 IEEE International Conference on. pp. 1–4. doi:10.1109/SGE.2012.6463964
- Ali, A.-F., Abdel-Akher, M., Ziadi, Z., Senjyu, T., 2013. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicle for voltage profile enhancement of distribution systems, in: Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2013 IEEE 10th International Conference on. pp. 399–404. doi:10.1109/PEDS.2013.6527052
- Amin, M., 2004. Balancing market priorities with security issues. Power Energy Mag. IEEE 2, 30–38. doi:10.1109/MPAE.2004.1310871
- Amin, S.M., Wollenberg, B.F., 2005. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. Power Energy Mag. IEEE 3, 34–41. doi:10.1109/MPAE.2005.1507024
- Balaji, B., Teraoka, H., Gupta, R., Agarwal, Y., 2013. ZonePAC: Zonal Power Estimation and Control via HVAC Metering and Occupant Feedback, in: Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings, BuildSys'13. ACM, Roma, Italy, pp. 18:1–18:8. doi:10.1145/2528282.2528304
- Batista, N.C., MelÃ-cio, R., Matias, J.C.O., CatalÃ-Ão, J.P.S., 2013. Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid. Energy 49, 306 – 315. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.002
- Bellido Outeirino, F.J., Arias, J.F., Linan-Reyes, M., Palacios-Garcia, E., 2013. In-home power management system based on WSN, in: Consumer Electronics (ICCE), 2013 IEEE International Conference on. pp. 546–547. doi:10.1109/ICCE.2013.6487013
- Bellido-Outeirino, F.J., Flores-Arias, J.M., Domingo-Perez, F., Gil-de-Castro, A., Moreno-Munoz, A., 2012. Building lighting automation through the integration of DALI with wireless sensor networks. Consum. Electron. IEEE Trans. On 58, 47–52. doi:10.1109/TCE.2012.6170054
- Bhuiyan, R.H., Dougal, R.A., Ali, M., 2010. A Miniature Energy Harvesting Device for Wireless Sensors in Electric Power System. Sens. J. IEEE 10, 1249–1258. doi:10.1109/JSEN.2010.2040173
- Bilgin, B.E., Gungor, V.C., 2012. Performance evaluations of ZigBee in different smart grid environments. Comput. Netw. 56, 2196 – 2205. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2012.03.002
- Boton-Fernandez, V., Lozano-Tello, A., Perez Romero, M., Cadaval, E.R., 2013. Intelligent decision support system for the efficient energy management in household environments, in: Information Systems and Technologies (CISTI), 2013 8th Iberian Conference on. pp. 1–6.
- Bult, K., Burstein, A., Chang, D., Dong, M., Fielding, M., Kruglick, E., Ho, J., Lin, F., Lin, T.-H., Kaiser, W.J., Marcy, H., Mukai, R., Nelson, P., Newburg, F.L., Pister, K.S.J., Pottie, G., Sanchez, H., Sohrabi, K., Stafsudd, O.M., Tan, K.B., Yung, G., Xue, S., Yao, J., 1996. Low power systems for wireless microsensors, in: Low Power Electronics and Design, 1996., International Symposium on. pp. 17–21. doi:10.1109/LPE.1996.542724

- Byun, J., Hong, I., Kang, B., Park, S., 2011. Implementation of an Adaptive Intelligent Home Energy Management System Using a Wireless Ad-Hoc and Sensor Network in Pervasive Environments, in: Computer Communications and Networks (ICCCN), 2011 Proceedings of 20th International Conference on. pp. 1–6. doi:10.1109/ICCCN.2011.6005942
- Colomer, J., Miribel, P., Saiz-Vela, A., Puig-Vidal, M., Samitier, J., 2008. Low-power conditioning circuit IC powered by piezoelectric energy harvesting, in: Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. pp. 2642–2646. doi:10.1109/IECON.2008.4758374
- DeBruin, S., Campbell, B., Dutta, P., 2013. Monjolo: An Energy-harvesting Energy Meter Architecture, in: Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '13. ACM, Roma, Italy, pp. 18:1–18:14. doi:10.1145/2517351.2517363
- de la Campa, S.A., Rodríguez-González, A.B., Ramos, J., Caamano, A.J., 2011. Distributed Detection of Events for Evaluation of Energy Efficiency in Buildings, in: New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on. pp. 1–6. doi:10.1109/NTMS.2011.5721142
- Dewan, A., Ay, S.U., Karim, M.N., Beyenal, H., 2014. Alternative power sources for remote sensors: A review. J. Power Sources 245, 129 – 143. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.081
- D. Hardt, 2013. RFC5849 The OAuth 2.0 Authorization Framework. Internet Engineering Task Force (IETF).
- Dunkels, A., Grönvall, B., Voigt, T., 2004. Contiki - a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors, in: Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (Emnets-I). Tampa, Florida, USA.
- Dwari, S., Parsa, L., 2008. Efficient low voltage direct AC/DC converters for self-powered wireless sensor nodes and mobile electronics, in: Telecommunications Energy Conference, 2008. INTELEC 2008. IEEE 30th International. pp. 1–7. doi:10.1109/INTLEC.2008.4664097
- Erol-Kantarci, M., Mouftah, H.T., 2011. Management of PHEV batteries in the smart grid: Towards a cyber-physical power infrastructure, in: Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International. pp. 795–800. doi:10.1109/IWCMC.2011.5982648
- E. Shelby, S. Chakrabarti, E. Nordmark, C. Bormann, 2012. RFC6775 Neighbor Discovery Optimization for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs). Internet Engineering Task Force (IETF).
- Foche, I., Chidean, M., Simó-Reigadas, F.J., Mora-Jiménez, I., Rojo-Álvarez, J.L., Ramiro-Barguenedean, J., Simó-Reigadas, F.J., Mora-Jiménez, I., Rojo-Álvarez, J.L., Ramiro-Bargueno, J., Caamano, A.J., 2012. Energy Efficiency in Communications and Networks, in: Gobriel, S. (Ed.), . InTech, <a href="http://www.intechopen.com/books/energy-efficiency-in-communications-and-networks" title="Energy Efficiency in Communications and Networks">Energy Efficiency in Communications and Networks</a>.
- Fortino, G., Guerrieri, A., O'Hare, G.M.P., Ruzzelli, A., 2012. A Flexible Building Management Framework Based on Wireless Sensor and Actuator Networks. J Netw Comput Appl 35, 1934–1952. doi:10.1016/j.jnca.2012.07.016

- Ghosh, A., Patil, K.A., Vuppala, S.K., 2013. PLEMS: Plug Load Energy Management Solution for Enterprises. 2013 IEEE 27th Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. AINA 0, 25–32. doi:<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/AINA.2013.45>
- Giorgio, A.D., Pimpinella, L., 2012. An event driven Smart Home Controller enabling consumer economic saving and automated Demand Side Management. Appl. Energy 96, 92 – 103. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.024>
- Grilo, A., Sarmento, H., Nunes, M., Gonçalves, J., Pereira, P., Casaca, A., Fortunato, C., 2012. A wireless sensors suite for Smart Grid applications. PS - ESTS – DEE - Comun. Em Congr.
- Gungor, V.C., Lu, B., Hancke, G.P., 2010. Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid. Ind. Electron. IEEE Trans. On 57, 3557–3564. doi:10.1109/TIE.2009.2039455
- Han, P., Wang, J., Han, Y., Zhao, Q., 2012. Novel WSN-based residential energy management scheme in smart grid, in: Information Science and Technology (ICIST), 2012 International Conference on. pp. 393–396. doi:10.1109/ICIST.2012.6221675
- Henry, R.F.Z., 2010. CEMA: Comfort Control and Energy Management Algorithms for use in Residential Space Through Wireless Sensor Networks. UNIVERSITY OF OTTAWA.
- He, W., Li, P., Wen, Y., Zhang, J., Yang, A., Lu, C., Yang, J., Wen, J., Qiu, J., Zhu, Y., Yu, M., 2013. Piezoelectric energy harvester scavenging {AC} magnetic field energy from electric power lines. Sens. Actuators Phys. 193, 59 – 68. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.12.042>
- Hipp, D.R., Kennedy, D., 2007. SQLite.
- IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2011. . IEEE Std 802154-2011 Revis. IEEE Std 802154-2006 1–314. doi:10.1109/IEEESTD.2011.6012487
- Ionic: Advanced HTML5 Hybrid Mobile App Framework [WWW Document], n.d. URL <http://ionicframework.com/> (accessed 2.9.16).
- Jiang, X., Dawson-Haggerty, S., Dutta, P., Culler, D., 2009a. Design and Implementation of a High-fidelity AC Metering Network, in: Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '09. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 253–264.
- Jiang, X., Polastre, J., Culler, D., 2005. Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks, in: Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '05. IEEE Press, Los Angeles, California.
- Jiang, X., Van Ly, M., Taneja, J., Dutta, P., Culler, D., 2009b. Experiences with a High-fidelity Wireless Building Energy Auditing Network, in: Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '09. ACM, Berkeley, California, pp. 113–126. doi:10.1145/1644038.1644050
- J. Postel, 1980. RFC768: User Datagram Protocol. Internet Eng. Task Force IETF.
- Jung, D., Krishna, V.B., Khiem, N.Q.M., Nguyen, H.H., Yau, D.K.Y., 2013. EnergyTrack: Sensor-Driven Energy Use Analysis System, in: Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings, BuildSys'13. ACM, Roma, Italy, pp. 6:1–6:8. doi:10.1145/2528282.2528289

- Kazandjieva, M., Gnawali, O., Heller, B., Levis, P., Kozyrakis, C., 2012. Identifying Energy Waste through Dense Power Sensing and Utilization Monitoring. CSTR.
- Kogawa, T., Ishihara, T., Ogura, K., Umeda, T., Sakamoto, T., 2011. Low power consumption wireless wake-up module controlling AC power supply at household appliances, in: Consumer Electronics (ISCE), 2011 IEEE 15th International Symposium on. pp. 393–396. doi:10.1109/ISCE.2011.5973856
- Krishna, V.B., Jung, D., Khiem, N.Q.M., Nguyen, H.H., Yau, D.K.Y., 2013. Demo Abstract - EnergyTrack: Sensor-Driven Energy Use Analysis System, in: Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings, BuildSys'13. ACM, Roma, Italy, pp. 38:1–38:2. doi:10.1145/2528282.2534158
- Lee, K.D., 2003. Electric load information system based on non-intrusive power monitoring (Thesis). Massachusetts Institute of Technology.
- Leland, E.S., Wright, P.K., White, R.M., 2009. A MEMS AC current sensor for residential and commercial electricity end-use monitoring. J. Micromechanics Microengineering 19.
- Levasseur, M.-A., Jomphe, S., Sicard, D., Dulipovici, A., Gagnon, F., Gagnon, G., 2012. A wireless sensor network for residential electrical energy consumption measurement, in: Electrical Computer Engineering (CCECE), 2012 25th IEEE Canadian Conference on. pp. 1–4. doi:10.1109/CCECE.2012.6334913
- Linlin, W., Yunfang, C., 2012. An intelligent management of community water and electricity based on wireless sensor network, in: Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2012 9th International Conference on. pp. 2581–2585. doi:10.1109/FSKD.2012.6234040
- Liu, J., Nie, L., Xu, Z., 2011. The Input-Sensing Problem in Ternary Computing and Its Application in Household Energy-Saving, in: Proceedings of the 2011 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications, GREENCOM '11. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 131–138. doi:10.1109/GreenCom.2011.31
- Liu, Y., 2012. Wireless Sensor Network Applications in Smart Grid: Recent Trends and Challenges. Int. J. Distrib. Sens. Netw. doi:http://dx.doi.org/10.1155/2012/492819
- Lu, B., Gungor, V.C., 2009. Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks. Ind. Electron. IEEE Trans. On 56, 4651–4659. doi:10.1109/TIE.2009.2028349
- Lu, B., Habetler, T.G., Harley, R.G., Gutierrez, J.A., 2005. Applying wireless sensor networks in industrial plant energy management systems. Part II. Design of sensor devices, in: Sensors, 2005 IEEE. p. 6 pp.–. doi:10.1109/ICSENS.2005.1597693
- Marchiori, A., Hakkarinen, D., Han, Q., Earle, L., 2011. Circuit-Level Load Monitoring for Household Energy Management. Pervasive Comput. IEEE 10, 40–48. doi:10.1109/MPRV.2010.72
- Marchiori, A., Han, Q., 2010. Distributed Wireless Control for Building Energy Management?, in: Proceedings of the 2Nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building, BuildSys '10. ACM, Zurich, Switzerland, pp. 37–42. doi:10.1145/1878431.1878441
- Marchiori, A., Han, Q., 2009. Using Circuit-level Power Measurements in Household Energy Management Systems, in: Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing

- 
- Systems for Energy-Efficiency in Buildings, BuildSys '09. ACM, Berkeley, California, pp. 7–12. doi:10.1145/1810279.1810282
- Marchiori, A., Han, Q., Navidi, W.C., Earle, L., 2012. Building the Case for Automated Building Energy Management, in: Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, BuildSys '12. ACM, Toronto, Ontario, Canada, pp. 25–32. doi:10.1145/2422531.2422536
- Mattern, F., Staake, T., Weiss, M., 2010. ICT for Green: How Computers Can Help Us to Conserve Energy, in: Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking, E-Energy '10. ACM, Passau, Germany, pp. 1–10. doi:10.1145/1791314.1791316
- Nguyen, N.-H., Tran, Q.-T., Leger, J.-M., Vuong, T.-P., 2010. A real-time control using wireless sensor network for intelligent energy management system in buildings, in: Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2010 IEEE Workshop on. pp. 87–92. doi:10.1109/EESMS.2010.5634176
- Ota, P.D. Nathan Ken, 2007. The application of wireless sensor networks to residential energy efficiency and demand response. University of California, Berkley.
- PEP 0249 -- Python Database API Specification v2.0 [WWW Document], n.d. . Python.org. URL <https://www.python.org/dev/peps/pep-0249/> (accessed 2.9.16).
- Porcarelli, D., Balsamo, D., Brunelli, D., Paci, G., 2013. Perpetual and Low-cost Power Meter for Monitoring Residential and Industrial Appliances, in: Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe, DATE '13. EDA Consortium, Grenoble, France, pp. 1155–1160.
- Rabaey, J., Ammer, J., Da Silva, J. J. L., Patel, D., 2000. PicoRadio: Ad-hoc wireless networking of ubiquitous low-energy sensor/monitor nodes, in: VLSI, 2000. Proceedings. IEEE Computer Society Workshop on. pp. 9–12. doi:10.1109/IWV.2000.844522
- Rong, X., Yu, X., 2011. An electric power monitoring and management system based on wireless sensor network, in: Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on. pp. 609–612. doi:10.1109/EMEIT.2011.6023175
- Salvadori, F., De Campos, M., Sausen, P.S., De Camargo, R.F., Gehrke, C., Rech, C., Spohn, M.A., Oliveira, A.C., 2009. Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network With Dynamic Power Management. Instrum. Meas. IEEE Trans. On 58, 3104–3111. doi:10.1109/TIM.2009.2016882
- Srinivasan, V., Stankovic, J., Whitehouse, K., 2013. FixtureFinder: Discovering the Existence of Electrical and Water Fixtures, in: Proceedings of the 12th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '13. ACM, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 115–128. doi:10.1145/2461381.2461398
- S. Turner, T. Polk, 2011. RFC6176: Prohibiting Secure Sockets Layer (SSL) Version 2.0. Internet Eng. Task Force IETF.
- Tashiro, K., Wakiwaka, H., Uchiyama, Y., 2012. Optimization of AC-DC converter for magnetic energy harvesting device, in: Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on. pp. 89–92. doi:10.1109/ICSensT.2012.6461795
-

The ZigBee Alliance | Control your World, n.d.

T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, K. Pister, R. Struik, JP. Vasseur, R. Alexander, 2012. RFC6550: RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. Internet Eng. Task Force IETF.

Weiss, M., Guinard, D., 2010. Increasing Energy Awareness Through Web-enabled Power Outlets, in: Proceedings of the 9th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM '10. ACM, Limassol, Cyprus, pp. 20:1–20:10. doi:10.1145/1899475.1899495

Weng, T., Balaji, B., Dutta, S., Gupta, R., Agarwal, Y., 2011. Managing Plug-loads for Demand Response Within Buildings, in: Proceedings of the Third ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, BuildSys '11. ACM, Seattle, Washington, pp. 13–18. doi:10.1145/2434020.2434024

Williams, E.D., Matthews, H.S., 2007. Scoping the potential of monitoring and control technologies to reduce energy use in homes, in: Electronics the Environment, Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on. pp. 239–244. doi:10.1109/ISEE.2007.369401

Xu, Q., Seidel, M., Paprotny, I., White, R.M., Wright, P.K., 2011. Integrated centralized electric current monitoring system using wirelessly enabled non-intrusive AC current sensors, in: Sensors, 2011 IEEE. pp. 1998–2001. doi:10.1109/ICSENS.2011.6127284

Z. Shelby, K. Hartke, C. Bormann, 2014. RFC7252 The Constrained Application Protocol (CoAP). Internet Engineering Task Force (IETF).



Fin